

KARELIA AMMATTIKORKEAKOULU
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Simo Kuittinen

TORREFIOIDUN RAAKA-AINEEN PELLETÖINTI

Opinnäytetyö
Helmikuu 2013



Euroopan unioni
Euroopan sosiaalirahasto



Pohjois-Karjalan
Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

Hajautetut biojalostamot
Decentralised Biorefineries



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND




Vipuvoimaa
EU:lta
2007-2013

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	Johdanto.....	5
2	Pelletti.....	7
3	Top-pelletin tuotantoketju	9
3.1	Raaka-aineen hankinta ja logistiikka	9
3.2	Hake torrefioidun pelletin raaka-aineena	15
3.3	Top-pelletin tuotanto.....	19
3.4	Torrefiointimenetelmät	25
3.5	Top-pelletin käyttömahdollisuudet.....	26
3.6	Puun koostumus ja ominaisuudet	30
3.6.1	Ligniinipitoisuus.....	31
3.6.2	Tuhka	33
4	Tutkimuksen tarkoitus.....	34
5	Aineistot ja menetelmät.....	35
5.1	Torrefioidun metsähakkeen pelletöintikokeet	35
5.2	Raaka-aineen tuotantokustannusten laskenta	40
6	Tulokset	42
6.1	Top-pelletin laatuominaisuudet	43
6.2	Top-pelletin tuotantokustannukset.....	45
6.3	Tuotantokustannusten tulkintaa.....	46
7	Tulosten analysointi	53
7.1	Jatkotutkimukset ja kehitysideat.....	54
8	Johtopäätökset ja yhteenveto	55
	LÄHTEET	60

	<p>OPINNÄYTETYÖ Helmikuu 2013 Ympäristötekniikan koulutusohjelma Ylempi ammattikorkeakoulututkinto</p> <p>Sirkkalantie 12 A 80200 Joensuu p. (013) 260 6900</p>
<p>Tekijä Simo Kuittinen</p>	
<p>Nimike Torrefioidun raaka-aineen pelletointi</p> <p>Toimeksiantaja Hajautetut biojalostamot ja uudet tuotteet (6078)</p>	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Euroopan unioni on asettanut tavoitteeksi, että kunkin Euroopan unionin jäsenmaan tulee lisätä uusiutuvien energiavarojen käyttöä vuoteen 2020 mennessä. Kullakin maalla on omat maakohtaiset strategiansa. Suomessa vuoden 2020 strategiassa uusiutuvan energian osuudeksi on kaavailtu 38 % koko energianloppukulutuksesta. Fossiilisten polttoaineiden kulutusta halutaan vähentää kasvihuonekaasujen takia.</p> <p>Tämä opinnäytetyö käsittelee torrefioidun raaka-aineen pelletöimistä. Torrefioidulla pelletillä (top-pelletillä) olisi tarkoitus korvata kivihiilen käyttöä ja edistää näin uusiutuvan energian käyttöä. Tutkimus antaa arvioin top-pelletin kokonaishinnasta toimitettuna energiatuottajan portille. Opinnäytetyössä tuodaan esille, millaisesta raaka-aineesta top-pellettiä voidaan valmistaa ja tarkastellaan top-pelletin laatuominaisuuksia. Lisäksi pohditaan, onko raaka-ainetta riittävästi saatavilla sekä millaisella logistisella järjestelyllä valmista top-pellettiä on järkevää kuljettaa matkan kasvaessa.</p> <p>Tutkimuksessa ilmenee, että hakkuutähte on kustannuksiltaan edullisin tapa valmistaa top-pellettiä. Top-pelletin hinta asiakkaalle toimitettuna junalla 342 km päähän maksaa noin 24 €/MWh. Top-pelletin raaka-ainetta on Pohjois-Karjalassa saatavilla hyvin ja kilpailu raaka-aineesta ei ole kovin suuri. Optimitilanteessa torrefiointiprosessi on lähes omavarainen energian suhteen. Top-pelletillä on suuri irtotiheys 750–850 kg/i-m³. Tämä tarkoittaa sitä, että normaaliin pellettiin verrattuna samalla kuljetusmäärällä voidaan kuljettaa noin 30 % enemmän energiaa. Kannattavuuslaskelmat vaativat lisäkokeita erilaisista top-pelleteistä. Jatkotutkimuksia on syytä tehdä myös valmiin top-pelletin jauhautumisesta ja palamisesta, jotta saadaan selville, kuinka paljon kivihiiltä top-pelletillä voidaan todellisuudessa korvata.</p>	
<p>Kieli Suomi</p>	<p>Sivuja 63</p>
<p>Asiasanat Uusiutuva energia, logistiikka, top-pelletti, top-pelletin hinta</p>	



THESIS
February 2013
Degree Programme in Environmental Technology
Master's Thesis
Sirkkalantie 12 A
80200 Joensuu
p. (013) 260 6900

Author
Simo Kuittinen

Title
Pelletizing torrefied material

Comissioned by
Hajautetut biojalostamot ja uudet tuotteet (6078)

Abstract

The European Union has set a goal that each member state of the European Union will increase the use of renewable energy sources by 2020. Each country has a country-specific strategy. In Finland, the 2020 strategy for renewable energy's share has been scheduled for 38% of the final energy consumption. Fossil fuel consumption is to reduce greenhouse gas emissions due.

This thesis deals with torrefied raw material pelletizing. Torrefied pellet (top-pellet) was intended to replace the use of coal, and thus to advance the use of renewable energy. The research provides the estimate of the top- pellet total price of the energy producer gates. This thesis will told what type of raw material to the top-pellets can be produced and examined top-quality pellet properties. In addition to considering whether the raw material is available in sufficient quantities, and what kind of logistical arrangements for the manufacture top-pellets makes sense to transport when distance increases.

The study shows that logging residues is the lowest-cost way to produce top-pellets. Top-pellet price customer delivered by train to 342 km away costs about 24 €/MWh. Top-pellets raw material is available in North Karelia very well and and the raw material competitive is not very large. Optimally, torrefied prosess is almost self-sufficient in energy. Top-pellet has a high bulk density of 750-850 kg/i-m ³. This means that the any transport would carry about 30% more energy of the pellet compared to transport normal pellet the same number (m ³). Profitability calculations require further testing a variety of top-pellets. Further studies should be made of the final top- pellets pulverizing and pellet burning to find out how much the top-coal pellets can actually be replaced.

Language
Finnish

Pages 63

Keywords
Renewable energy, logistics, top-pellet, top-pellet price

1 Johdanto

Lämmitysöljyä tilataan talven varalle ja kivihiilivarastojen määrät ovat Suomessa noin 80 % suuremmat kuin vuonna 2011 (Tilastokeskus 2012). Näiden tosiasioiden valossa mielikuvat, että olisimme riippumattomia öljystä, energiaomavaraisia tai että uusiutuvat energiat ja pienemmät hiilidioksidipäästöt olisivat meille itsestään selvää, osoittavat, että bioenergia-alalla vihreän kullan maassa Suomessa on vielä paljon tehtävää.

Uusiutumattomien poltettavien raaka-aineiden määrän väheneminen ja hiilidioksidipäästöjen hillitseminen on kiihdyttänyt biomassan polttamista. Päästöoikeusmaksuilla pyritään vähentämään fossiilisten raaka-aineiden käyttöä, ja uusiutuvasta energiasta halutaan tehdä entistä monipuolisempia ja turvallisempia tuotteita. Biopolttoaineita halutaan käyttää energian tuottamiseen entistä enemmän, mutta liian moni biopolttoaine sisältää runsaasti vettä, jolloin sen kuljettaminen käyttöpaikalle on kallista ja polttamisesta ei saada tarpeeksi energiaa.

Tämä opinnäytetyö on osa Hajautetut biojalostamot -hanketta, jota toteuttavat Itä-Suomen yliopisto sekä Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Hankkeen tarkoituksena on luoda metsäbiomassasta mahdollisuus kehittyneissä polttoaineissa ja uusissa tuotteissa ja materiaaleissa.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, miten torrefioitua pellettiä valmistetaan ja mitä hyötyjä torrefioidusta biomassasta saadaan, kun se pelletoidaan. Laboratoriokokeiden ja aikaisempien tutkimusten perusteella muodostuu hinta (€/MWh), jonka top-pelletin tuottaja voisi saada. Torrefioiduksi puuksi kutsutaan biomassaa, jota paahdetaan 200–300°C:n hapettomassa lämpötilassa. Torrefioidulla pelletillä pystynee korvaamaan ympäristölle haitallista kivihiiltä, ja sillä oletetaan olevan maailmanlaajuiset markkinat. Onnistuessaan syrjäyttämään kivihiilen torrefioitu pelletti lisää kotimaisia työpaikkoja usealla paikkakunnalla ja vähentää hiilidioksidin muodostumista. Opinnäytetyössä oletetaan, että pelletin valmistus paikka olisi Vapon sulkema tehdas Ilomantsissa. Tällä hetkellä maailmassa ei ole muita kuin koe-laitoksia, joissa tehdään torrefioitua pellettiä, joten tutkimuksesta saatu tieto on huomionarvoista.

Euroopan komissio edellyttää Euroopan unionin jäsenmaille päästöjen vähentämistavoitteita (Euroopan komissio 2012, 1–3). Maakuntatasolla Pohjois-Karjalassa ilmasto- ja energiapoliittiset linjaukset ovat suuret. Euroopan metsämaakunnaksikin kutsuttu Pohjois-Karjala on asettanut tavoitteeksi luopua kokonaan öljyn käytöstä lämmöntuotannossa vuoteen 2020 mennessä. Pohjois-Karjala on asettanut tavoitteeksi vähentää kasvihuonepäästöjä 20 % enemmän kuin EU:n ilmastotavoitteeksi on asetettu ja uusiutuvan energian osuudeksi on kaavailtu yli 80 % energian loppukulutuksesta. (Pohjois-Karjalan Ilmasto- ja energiaohjelma 2020, 16–22.) Ilmastonmuutoksen on arveltu lisäävän bioenergiankäyttöä tulevaisuudessa entisestään. Niinpä bioenergiaklusterin mahdollisuudet maakunnassa ja kansainvälisestikin nähdään suurena voimavarana.

Pohjois-Karjalan maakunnassa on jo nyt vahva bioenergiaosaaminen. Eri alueilla maakunnan sisällä suositaan panostuksia vahvuuksiin, jotka ovat jo kehittyneet kullekin alueelle bioenergiapuolella. Esimerkiksi Joensuussa panostetaan koulutukseen ja tutkimiseen, Uimaharjussa Enocell tuottaa sellutehtaan energian omavaraisesti, ja Enossa on keskitytty hakevoimalaitoksiin. Lisäksi itäsuomalaisen konevalmistajien osuus metsäkonemarkkinoista on koko maailmassa 20–30 % ja Euroopan osuus on jopa 50 %. (Suomen Metsäkeskus 2012–2015, 12.) Itä-Suomessa uusille pilottihankkeille näytetään bioenergiaohjelmassa vihreää valoa ja Itä-Suomeen bioenergia-alasta on tullut brändi, joka halutaan nostaa kansainvälisestikin korkealle. Uusiutuvan energian osuus Itä-Suomessa on noin kaksi kertaa suurempi muuhun Suomeen verrattuna (Pohjois-Karjalan maakuntaliitto 2012, 3). Bioenergian käyttöä tulisi lisätä omavaraisuusastetta lisäämällä. Tavoite tulisi tehdä siten, että se on taloudellisesti kestävä. Tämä tarkoittaa myös sitä, että koneita, laitteita ja tuotteita kehitetään energiaa säästäviksi, ja toisaalta koneiden sekä tuotteiden halutaan tuottavan enemmän energiaa. Sähköntuotantoon on myös kaavailtu strategiaa, jossa uusiutuvilla energialähteillä tuotetaan sähköä yli oman kapasiteetin tarpeen.

Torrefioidulla pelletillä on tarkoitus vastata uusiutuvan energian kysyntään ja olla tuotteena toisen sukupolven pelletti. Top-pelletillä on mahdollisuus vähentää kuljetuksia ja kivihiilen käyttöä sekä parantaa aluetaloutta. Hiilidioksidipäästöt vähenevät käytettäessä top-pellettiä ja metsäenergialle saadaan enemmän lisäarvoa.

2 Pelletti

Suomessa pelletin läpimitta on yleisesti 6–10 mm ja pituus 10–30 mm. Hyvälaatuinen pelletti sisältää alle 10 % kosteutta. Tuhkapitoisuus vähentää energiasisältöä, minkä vuoksi hyvälaatuisessa pelletissä on tuhkaa alle 0,7 %. Pelletin tilavuuspaino on yli 600 kg/irto-m³ ja energiasisältö yli 4,7 KWh/kg. (Obernberger & Thek 2010, 22.) Pelletti on ympäristöystävällistä, koska ainoa lisäaine, mitä seokseen lisätään, on tärkkelys. Kostuessaan pelletti turpoaa ja hajoaa helposti, minkä takia pelletti tarvitsee kuivat säilytystilat. (Obernberger & Thek 2010, 128.)



Kuva 1. Kuiva ja kostunut pelletti (Kuva: Simo Kuittinen.)

Pellettitekniologia on peräisin eläinten ruokateollisuudesta (Obernberger & Thek 2010, 100). Suomeen pelletin tuotanto jalkautui 1990-luvulla (Pellettienergia 2012). Nykyisin pellettitekniologiaa hyödynnetään energiantuotantoon niin pienissä omakotitaloissa kuin suurissa voimalaitoksissa. Pääsääntönä on, että mitä pienempi käyttötarve on, niin sitä parempilaatuista pellettiä on käytettävä.

Kuoritusta puhtaasta puusta tehdyt pelletit soveltuvat parhaiten pienkäyttäjille ja kuorellisesta puusta tehdyt pelletit teollisuuden käyttöön. Eurooppalaisen EN-14961-2-standardin mukaan pelletit jaetaan kolmeen eri luokkaan. Luokat ovat paremmuusjärjestyksessä A1, A2 ja B-luokka. Keskeisimpiä asioita luokittelussa ovat pelletin irtotiheys (kg/i-m³), energiasisältö (Kj/kg), kosteuspitoisuus (%), pituus, kestävyys sekä tuhkan sulamispiste. (Obernberger & Thek 2010, 22.)

Kuvassa 2 on pelletin tuotantolaitokset Suomessa vuonna 2008.

Pelletin tuotantolaitokset 2008

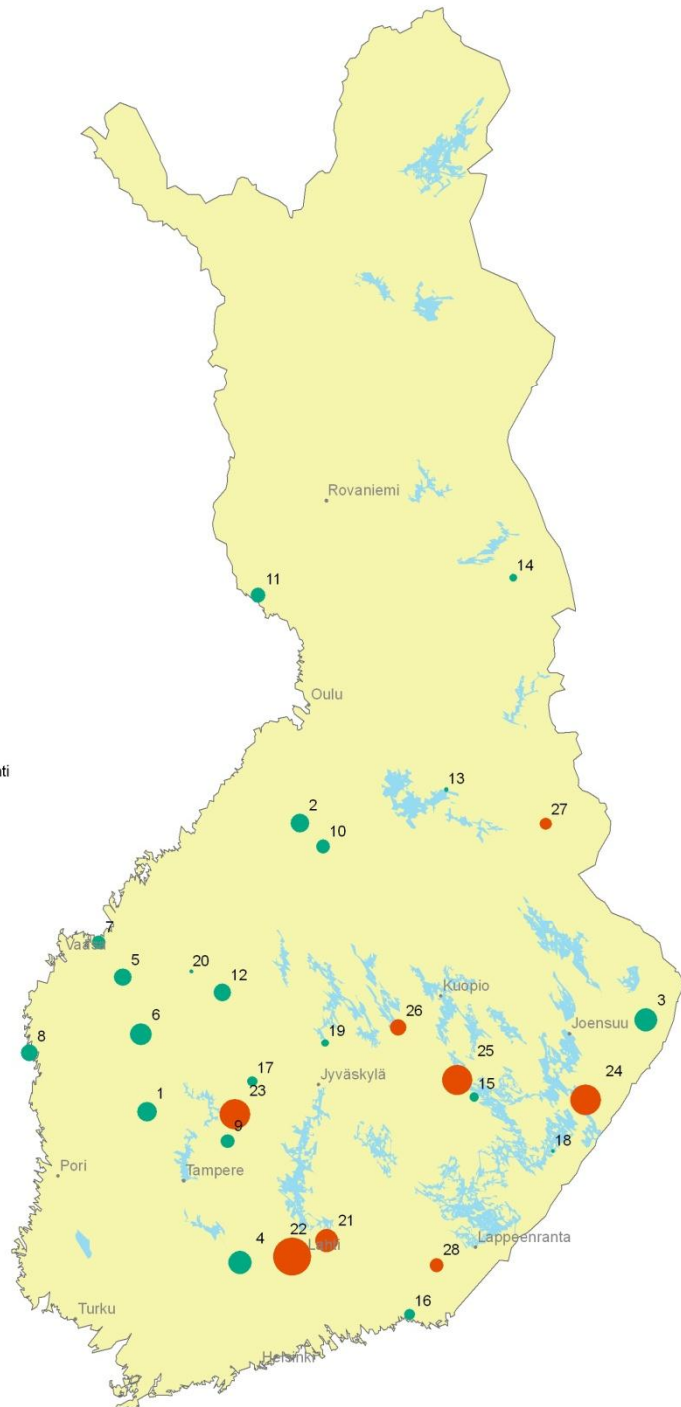
- Toiminnassa
Kapasiteetti, tonnia vuodessa
- 1,000
 - 10,000
 - 100,000
- Valmisteilla
Kapasiteetti, tonnia vuodessa
- 10,000
 - 50,000
 - 100,000
- Nr Nimi
- 1 Parkanon Pellet Oy, Parkano
 - 2 Vapo Oy, Haapavesi
 - 3 Vapo Oy, Ilomantsi
 - 4 Vapo Oy, Turenki
 - 5 Vapo Oy, Ylistaro
 - 6 Vapo Oy, Haukineva
 - 7 Vapo Oy, Vöyri
 - 8 Vapo Oy, Kaskinen
 - 9 Paahtopuu Oy, Korkeakoski
 - 10 Vapo Oy, Kärämäki
 - 11 Lapin Ekolämpö Oy, Keminmaa
 - 12 Länsi-Suomen Biopower Oy, Soini
 - 13 Jannpellet Oy, Paltamo
 - 14 Formados Oy, Kuusamo
 - 15 Savon Bioenergia Oy, Rantasalmi
 - 16 Haminan Puunjalostus Oy, Vehkalahti
 - 17 Keurak Oy, Keuruu
 - 18 Punkarjun Pelletti Ky, Punkaharju
 - 19 Suolahden Höyläamö Oy, Suolahti
 - 20 Järvisuon Pelletti Oy, Haukkala
 - 21 Versowood Oy, Heinola
 - 22 Finn Pellets Oy, Hollola
 - 23 Vapo Oy, Vilppula
 - 24 Stora Enso Oyj, Kitee
 - 25 Varwood Oy, Varkaus
 - 26 L & T Biowatti Oy, Suonenjoki
 - 27 M-Pelletti Oy, Kuhmo
 - 28 L & T Biowatti Oy, Luumäki

METLA
Metsätalouden tutkimuskeskus
Forest Research Institute Finland

NORTH KARELIA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Northern
Periphery
Programme
2007-2013

PELLETime



Kuva 2. Pelletin tuotantolaitokset Suomessa (Kuva: Pelletime 2008.)

Suomessa tuotettiin pellettiä noin 80 000 tonnia 2000-luvun alussa. Pelletin tuotanto oli vuonna 2010 lähes 300 000 tonnia, mutta huippuvuotena 2008 tuotanto oli jopa 375 000 tonnia. Valtaosa pelletin tuotannosta menee vientiin. Suurin osa pelletistä viedään Tanskaan ja Ruotsiin. Energiana mitattuna pelletin tuotanto on tällä hetkellä noin 1,4 TWh. Vuonna 2009 Suomessa kulutettiin pellettiä 156 000 tonnia (1,0 TWh). Vuonna 2020 työ- ja elinkeinoministeriön asettaman tavoitteen mukaan Suomen tulisi kuluttaa pellettiä vuodessa 2 TWh. (Pellettienergia 2012.)

3 Top-pelletin tuotantoketju

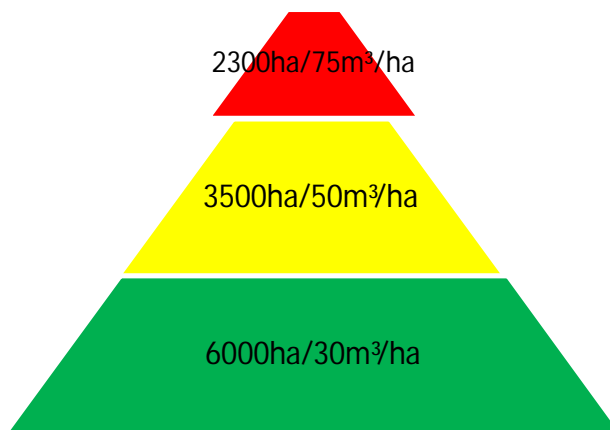
3.1 Raaka-aineen hankinta ja logistiikka

Ilomantsin alueella, joka on lähinnä tuotantotehdasta, ei ole mahdollista saada pelletin raaka-ainetta lähialueen metsistä kokonaan. Top-pelletin raaka-ainetarve on 175 000 m³, joka muodostuu vuosittaisesta oletetusta tuotannosta (70 000 tonnia/a) valmista top-pellettiä. Ilomantsin alueen metsissä tekninen korjuupotentiaali on pienpuun (harvennushakkuut) osalta noin 97 000 m³ (noin 3 000 ha/vuosi) sisältäen havu- ja lehtipuut sekä hakkuutähdettä noin 44 000 m³. Yhteensä korjuupotentiaali on noin 141 000 m³. (Ilomantsin energias strategian 2009–2020 toimenpideohjelma, 5.) Teknistä korjuupotentiaalia ei käytännössä voida hyödyntää, joten raaka-ainetta on kuljetettava muilta alueilta. Teknisestä korjuupotentiaalista hyödynnetään Suomessa yleensä viidennes (Ilomantsin energias strategian 2009–2020 toimenpideohjelma, 5). Lisäksi korjuupotentiaali jakautuu useille toimijoille, joten raaka-ainetta on tuotava alueen ulkopuolelta.

Pohjois-Karjalan bioenergiaohjelmassa vuonna 2015 on harvennuksilta arvioitu saatavan energiapuuta 100 000–300 000 m³ (200 000–600 000 MWh). Arvio sisältää havu- ja lehtipuut. Minimimäärä 100 000 m³ on arveltu kertyvän reheviltä mailta, joissa metsänhoidollinen tarve on suuri. Hakkuukertymä on pääasiassa lehtipuuta. Korkeammassa luvussa on oletettu, että joka kolmannen ensiharvennushehtaarin

puustosta ohjautuu kuitupuuta osittain energiakäyttöön. Korjuun on oletettu toteutuvan koko- ja osapuukorjuuna. (Pohjois-Karjalan bioenergiaohjelma 2015, 10–11.)

Pohjois-Karjalan alueella yksityiset omistavat metsää 831 000 ha, joka on 52 % kaikesta metsästä Pohjois-Karjalassa. Eniten on metsänomistajia, joiden omistusosuus on 20–49,9 ha. Pääpuulaji Pohjois-Karjalassa on mänty, jota on 934 000 ha eli 64 % pinta-alasta. Markkinahakkuita tehdään vuosittain keskimäärin 4,664 milj. kuutiota ja Pohjois-Karjalan metsät kasvavat vuodessa n. 5,8 m³/ha. (Metsäkeskus 2012.) Alla esitetystä kuviosta 1 ilmenee, kuinka paljon vuotuinen hakkuutarve on erilaisilla hakkuukertymillä.

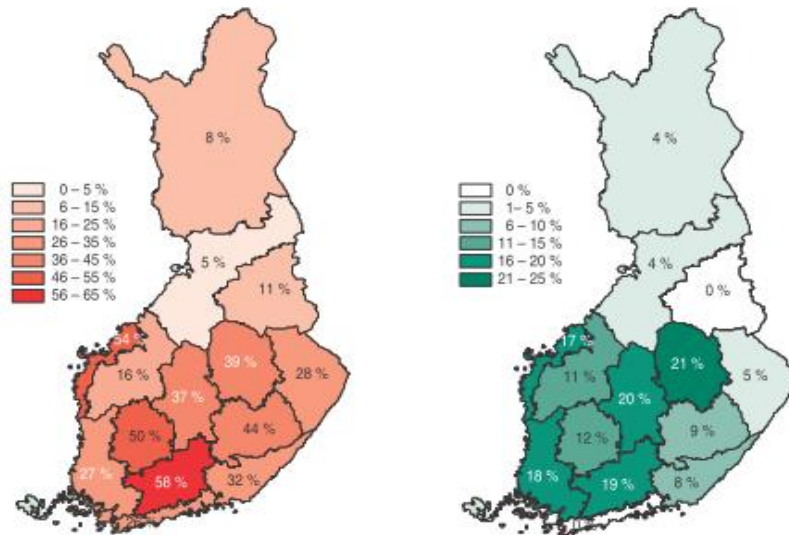


Kuvio 1. Hakkuutarve erilaisilla hakkuukertymillä.

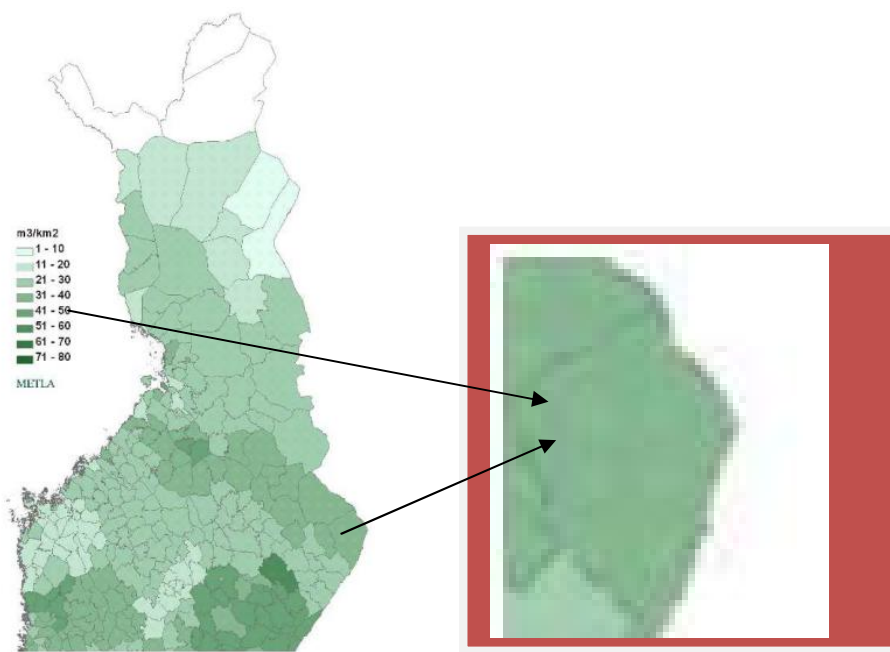
Esimerkiksi hakkuutarpeen ollessa 175 000 m³ tarvitsee harventaa 6000 ha metsää, jos kertymä on 30 m³/ha. Kertymän ollessa 50 m³/ha harvennustarve on 3500 ha ja kertymän ollessa 75 m³/ha on harvennustarve 2300 ha. Vuonna 2010 kasvatushakkuita tehtiin 17 000 hehtaarilla (Metsäkeskus 2010). Kuusikon päätehakkuumäärän ollessa 200–250 m³ saadaan hakkuutähdettä kerättyä noin 40–75 m³ (Hakkuutähdhake 2012).

Top-pelletin raaka-aineeksi mäntyä on saatavissa Pohjois-Karjalassa varttuneista taimikoista ja kasvatusmetsistä seuraavanlaisesti: Männyn osuus hakattavissa olevista puista on 64 % eli 100 000–300 000 m³:n poistumasta mäntyä olisi 60 000–180 000 m³. Metsäkeskuksen (2012) mukaan vuonna 2010 mäntykuitua hakattiin 1,434 milj. m³ ja metsähakkeen energiakäyttö oli 561 000 m³, josta 82 000 m³ oli Kemera-kohteilta saatua haketta. Kuvassa 3 näkyy latvusmassakohteiden ja kannonnostokohteiden

prosenttiosuus yksityismetsien avohakkuualoista. Kuvassa 4 on puolestaan nuorten metsien energiapuumäärät Suomessa.



Kuva 3. Latvusmassakohteiden ja kannonnostokohteiden prosenttiosuus yksityismetsien avohakkuualoista (Kuva: Anttila & Laitila Metla 2008)

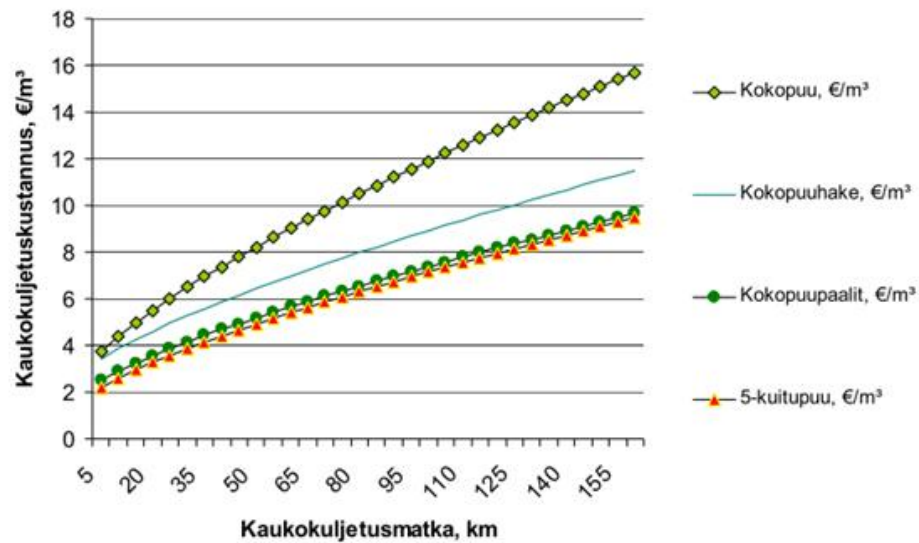


Kuva 4. Nuorten metsien energiapuumäärä (Kuva: Anttila & Laitila Metla 2008)

Logistiikka

Toimiessaan juna- ja laivaliikenteen sanotaan olevan ympäristöystävällinen vaihtoehto bioenergian kuljetuksiin sekä tuovan säästöjä pitkillä kuljetusmatkoilla (Laitila, Leinonen, Flyktman, Virkkunen & Asikainen 2010, 41). Loppukäyttäjän sijainnilla on merkitystä siihen, tuodaanko polttoaine sinne laivalla, junalla vai maanteitse. Myös top-pellettiä valmistavan tehtaan sisään tulevia logistisia vaihtoehtoja on syytä huomioida. Suomessa kivihiiltä käyttävät voimalaitokset sijaitsevat Lahtea ja Vantaata lukuun ottamatta rannikon läheisyydessä. (Flyktman, Kärki, Hurskainen, Helynen & Sipilä. 2011, 54.) Suuret energiantuottajat sijaitsevat lähellä kuluttajia, ja tämän takia on syytä pohtia, millä tavalla polttoainetta tehtaalle tuodaan. Logistisia vaihtoehtoja ovat maanteitse rekalla, vesiteitse laivalla tai rautateitä pitkin junalla. Laiva- ja junakuljetukset saattavat lisäksi tarvita pienen kuljetusmatkan autolla ennen polttoaineen päätymistä loppukäyttäjälle.

Ilomantsin tehdasta ajatellen raaka-aine tulisi tehtaalle ensisijaisesti maantiekuljetuksina. Laitilan ym. (2010, 41) mukaan metsähakkeen kuljettaminen maanteitse on kannattavaa 100–150 km päästä. Alla on kuva, josta ilmenee eri tavalla käsitellyn raaka-aineen kuljetuskustannukset. Ko. tutkimuksessa latvusmassan haketukseen ja kuormaukseen kului enemmän aikaa verrattuna kokopuuhakkeen tekoon. Kuitupuun kuljetukset asettuvat hinnaltaan taulukon alapäähän ja suosivat tästä johtuen käyttöpaikkahaketusta. Kustannukset nousevat lineaarisesti matkan kasvaessa. Osaltaan kustannuksia lisää hakkurin tai hakeauton/energiapuuauton odotusaika lastaus- tai purkuvaiheessa. (Korpinen, Föhr, Saranen, Väätäinen & Ranta 2011, 34.)



Kuva 5. Kokopuun, 5 m kuitupuun, kokopuupaalien ja kokopuuhakkeen kaukokuljetuskustannukset kuljetusmatkan mukaan. (Kuva: Laitila & Väättäin 2010, Laitila ym. 2010, 101 mukaan.)

Alla on taulukko valmiin tuotteen maantiekuljetuksista. Vertailtavina ovat hake- ja pellettikuljetukset.

Taulukko 1. Hakkeen ja pelletin kuljetuskustannukset 50–150 km matkalla. (Taulukko: Puolakanaho 2007, 54.)

Yhdistelmä- ajoneuvo 32 t/ 120 m ³	50 km		75 km		100 km		125 km		150 km	
	€/t	€/m ³	€/t	€/m ³	€/t	€/m ³	€/t	€/m ³	€/t	€/m ³
Hake	34,85	1,57	44,4	2,00	53,95	2,43	63,5	2,86	73,05	3,29
Pelletti	5,88	3,82	7,49	4,87	9,1	5,92	10,72	6,97	12,33	8,02

Hakkeen kuljettaminen näyttäisi olevan pidemmällä matkoilla huomattavasti kalliimpaa kuin pelletin. Pelletin kuljetuksessa ongelmana on paino. Torrefioitu pelletti painaa noin 750–850 kg/i-m³. Yhdistelmäajoneuvolla voidaan kuljettaa 37 tonnia kuormaa + oman painon 23 tonnia. Keskiarvolla 800 kg/i-m³ kuljetuskapasiteetti on 46 irtokuutiota/37 t. Yhdistelmäajoneuvon kapasiteetti on 120 m³, joten auto kannattaisi muokata sopivammaksi pelletin kuljetukseen. Automaattisella rengaspaineiden säätelyllä voitane

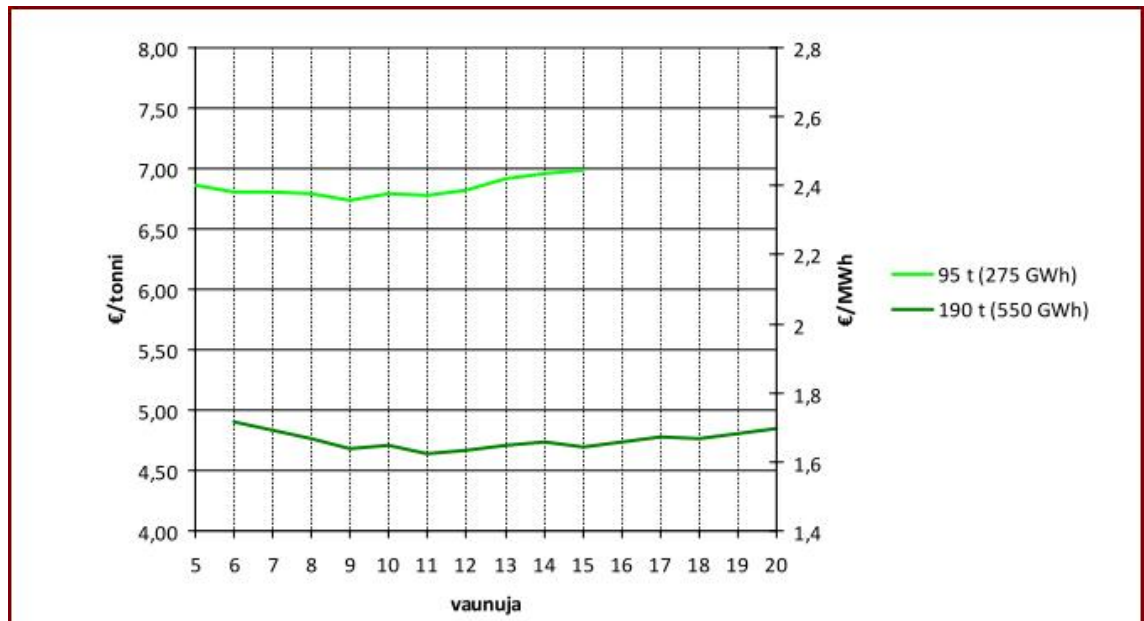
saada polttoaineen kulutusta pienemmäksi. Ruotsissa puutavara-autoilla on kokeiltu yli 90 t maantiekuljetuksia ja kaivosteollisuudessa jopa 130 t kuljetuksia (Elinkeinoelämän keskusliitto 2011.) Pitkä kuljetusmatka ei ole pelletinkään kohdalla järkevää.

Laiva- ja junakuljetukset

Laivalla tapahtuvia kuljetuksia pystyttäisiin tekemään noin kahdeksana kuukautena, koska vesistöjen jäätyminen estää liikkumisen ympäri vuoden. Ympärivuotinen laivaliikenne olisi suotavaa varsinkin, kun joulu–helmikuu ovat energiantuottajien kannalta tärkeimmät kuukaudet. Mikäli loppukäyttäjällä on tarpeeksi varastointitilaa, voi kylmien kuukausien laivalastit tuoda ennakkoon varastoihin tai tuoda osan polttoaineesta muilla kuljetuksilla. (Korpinen ym. 2011, 60) Proomussa kulkee kerralla 3000–5000 i-m³ haketta, mikä vastaa noin 24–40 hakerekkakuormaa. Kuormien määrä riippuu käytettävästä kalustosta. (Ranta 2010, Laitilan ym. 2010, 42 mukaan.) Simulaatiokokeissa laivakuljetukset tulivat maksamaan hakkeelle 1,7–4,17 €/MWh. Matkat simulaatiokokeissa olivat 333 km ja 220 km. Laivoilla kuljetettiin 360–1 200 tonnia hake-eriä. Edullisin vaihtoehto oli kuljettaa haketta 1 200 tonnin aluksella. Laivoilla kuljetukseen suunniteltu laskennallinen hakemäärä oli 72 000 tonnia. (Korpinen ym. 2011, 48–59.)

Junakuljetuksille tehdyn simulaatiomallin avulla kuljetukset tulivat maksamaan keskimäärin 5,98 €/t eli noin 2,1 €/MWh. Laskelmissa kuljetusmatka oli keskimäärin 342 km ja junavaunuja kuljetettiin 5–20 kpl. Yhdessä vaunussa pystytään kuljettamaan noin 60 tonnia tavaraa. (Korpinen ym. 2011, 52–56.) Pelletin kuljetuksessa €/t kustannus pysyy vakiona, mutta hakkeeseen verrattuna €/MWh laskee. Top-pelletti sisältää energiaa noin 3,9–5,14 MWh ja hake ainoastaan 0,7–0,9 MWh. Hakkeen kosteuden ollessa esim. 45 % antaa se lämpöarvon 7,5 MJ/kg ja top-pelletin kosteuden ollessa 1 % verran on lämpöarvo noin 21,6 MJ/Kg. Normaalin puupelletin kosteuden ollessa noin 8 % on lämpöarvo n. 16,8 MJ/Kg. (Flyktman ym. 2011, 32.) Top-pellettiä kuljetettaessa energiaa voidaan kuljettaa noin 3 kertaa enemmän hakkeeseen verrattuna ja noin 1,3 kertaa enemmän puupellettiin verrattuna.

Ilomantsin Vapon tehtaalla 70 000 tonnin top-pellettimäärälle ei ole laskettu kannattavaa vaunujen määrää ja kuljetuskertoja/vuosi, koska päivittäistä tuotantokapasiteettia ei ole tiedossa. Alla esitetyssä kuvassa näkyy hakkeen osalta kuljetuskustannukset 95 t:n ja 190 t:n junakuljetuserille. (Korpinen ym. 2011, 56.)



Kuva 6. Kuljetuskustannuksien suhde käytettyjen vaunujen määrään. (Kuva: Korpinen ym. 2011, 56.)

500 km:n vesi- tai rautatiekuljetus toisi biopolttoainelasteille kustannusta noin 5 €/MWh (Flyktman ym. 2011, 10). Ruotsissa on tehty tutkimuksia, joissa junilla on kuljetettu haketta. Hakkeen kuljetus on ollut junalla halvempaa kuin maanteitse silloin, kun kuljetusmatka on ollut vähintään 150 km (Enström 2009–2010, Laitila ym. 2010, 44 mukaan).

3.2 Hake torrefioidun pelletin raaka-aineena

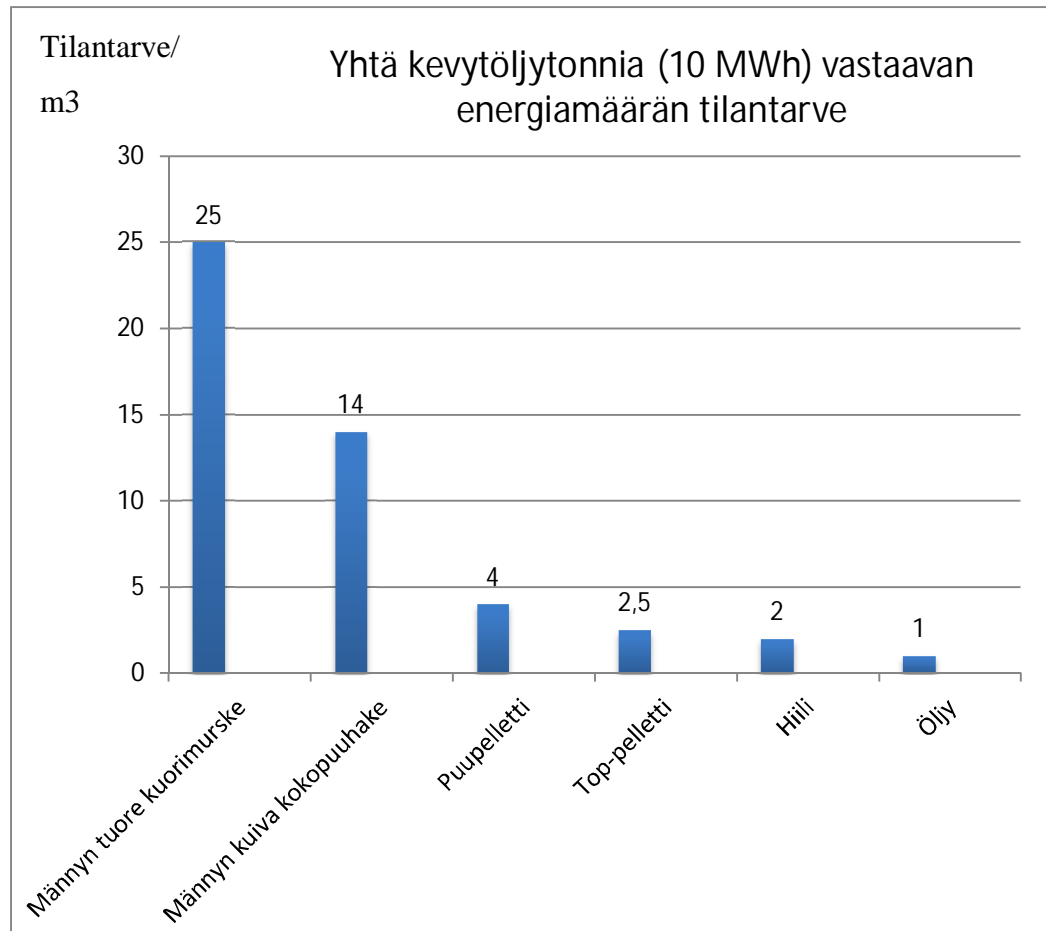
Metsähake tehdään tyypillisesti harvennuspuusta ja päätehakkuun jälkeen kannoista ja hakkuutähteistä. Suomessa metsähakkeen käyttöä on tarkoitus lisätä vuoteen 2020 mennessä sähkön ja lämmöntuotannossa noin 16 TWh, jolloin sen kokonaismääräksi muodostuisi noin 25 TWh. Kivihiilikattiloissa sitä tulisi käyttää noin 8 TWh sekä puuta

ja turvetta käyttävissä lämpö- ja voimalaitoksissa noin 9 TWh. (Virkkunen, Flyktman & Raitila 2012, 2.)

Energiapuu sitoo valtavan määrän pääomaa teiden varsille kaikissa muodoissaan. Energiapuukasoja kuivatetaan teidenvarsilla yleensä vuoden verran tai pidempään riippuen, ovatko kelit olleet kuivumisen kannalta suotuisia. Pääoman seisomisen lisäksi energiapuukasoista tulee paljon huomautuksia alueella asuvilta ihmisiltä. Tienvarressa tapahtuva haketus jättää tielle aina jälkensä joko roskien muodossa tai tiestön hajoamisena. Lisäksi kantojen ja hakkuutähteiden keruu viivästyttää uusien taimien istuttamista monesti 1–2 vuotta.

Taloudellisesti kannattava toimintasäde kuljettaa haketta tehtaaseen on noin 100–150 km (Laitila ym. 2010, 41). Pääsääntöisesti haketta pidetään paikallisena polttoaineena, eikä sen kuljettaminen pitkän matkan päähän ole kannattavaa alhaisen energian ja suuren tilantarpeen vuoksi. Hakkeen tärkeimmät laatuominaisuudet ovat irtotiheys, kosteus, tehollinen lämpöarvo sekä palakoko. Hake soveltuu polttoaineeksi pienille ja suurille käyttäjille lämmön ja sähköntuotantoon. (Kokkonen & Lappalainen 2005, 26.) Metsähakkeella on tarkoitus korvata kivihiilikattiloiden energiantarvetta yhteensä 8 TWh. (Virkkunen ym. 2012, 2)

Alla on kuvio, josta selviää, kuinka paljon eri polttoaineet tarvitsevat varastotilaa tuottaakseen saman energiamäärän.



Kuvio 2. Eri raaka-aineiden tilantarve 10 MWh tuottamisessa

(Kuvio: Hakkila 2000, Alakangas, 2000, 149 mukaan). Kuvioon on lisätty top-pelletti, jonka energiatiheys on n. 3,9–5,14 MWh/i-m³ (Bergman 2005b, 2).

Raaka-aineen valinnalla on suuri merkitys onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi. Pelletin valmistukseen käytetään yleensä puupohjaisia raaka-aineita, kuten kutterinpurua, puunhiontapölyä tai sahanpurua. Yleisin pelletinvalmistuksen raaka-aine on havupuiden ja lehtipuiden sahanpuru, jota saadaan sahoilta ja muilta puunjalostuksen sektoreilta. Pääsääntöisesti havupuut soveltuvat pelletöintiin paremmin, muun muassa runsaamman ligniinipitoisuuden takia. Ligniini antaa pelletille lujuutta. Myös turve, pyöreäpuu sekä erilaiset ruokohelpiseokset ovat pelletin raaka-aineita. (Obernberger & Thek 2010, 72, 85.)

Floridassa on tehdas, joka käyttää pelletin raaka-aineena rankapuusta saatavaa haketta. Ennen haketusta rangasta poistetaan kuori, minkä jälkeen se kuivataan ja puristetaan pelletiksi. (Green Circle Bio 2012). Puun kuivaukseen menevä aika riippuu siitä, kuinka paljon se sisältää vettä. Puun kosteuteen vaikuttavat muun muassa, missä puu on kasvanut, mikä puulaji on kyseessä, mistä puunosasta haketta on tehty sekä kuinka vanha puu on ja käytetäänkö raaka-aineena tuoretta vai varastoitua puuta. (Alakangas 2000, 39.)

Hake voi tulla pellettitehtaalte valmiina hakkeena, rankana tai metsätähteenä. Rankana ja metsätähteenä tullut raaka-aine haketetaan kiinteällä hakkurilla käyttöpaikassa. Pellettiin käytettävä hake voidaan tehdä kuorellisesta tai kuorimattomasta puusta, kannoista, hakkuutähteistä sekä puun kuoresta.

Tuoreen hakkuutähteen käyttö voi heikentää maanravinnepitoisuutta ja heikentää tulevien puiden kasvua. Lisäksi tuorebiomassa, etenkin neulasets sisältävät runsaasti mineraaleja. (Alakangas 2000, 39, Hakkila & Kalaja 1983, mukaan.) Biomassan käyttäytyminen poltossa ja mineraalien määrä torrefioinnin jälkeen on syytä tutkia paremmin.

Hakkeen sekä kokonaisen raaka-aineen kosteuspitoisuuden on oltava sellainen, etteivät lahosienet pääse toimimaan raaka-aineessa. Joillakin lahottajasienillä on katsottu kuitenkin olevan positiivisia vaikutuksia prosessin myöhemmissä vaiheissa. Esimerkkinä mainittakoon valko- ja ruskolahosienet. Puun uuteaineets sisältävät monia erilaisia yhdisteitä kuten fenoleita, rasvoja, terpeenejä ja tervaa. (Vanninen 2009, 14.) Puun lahoamisessa myös uuteaineiden hajoamisella voi olla ratkaisevaa merkitystä,

mutta ainakin ligniinin hajoaminen on tärkeässä asemassa, sillä ligniini lujittaa puusolun rakennetta. Oksissa on enemmän ligniiniä kuin kuoressa (Lehtikangas 2001, 35).

3.3 Top-pelletin tuotanto

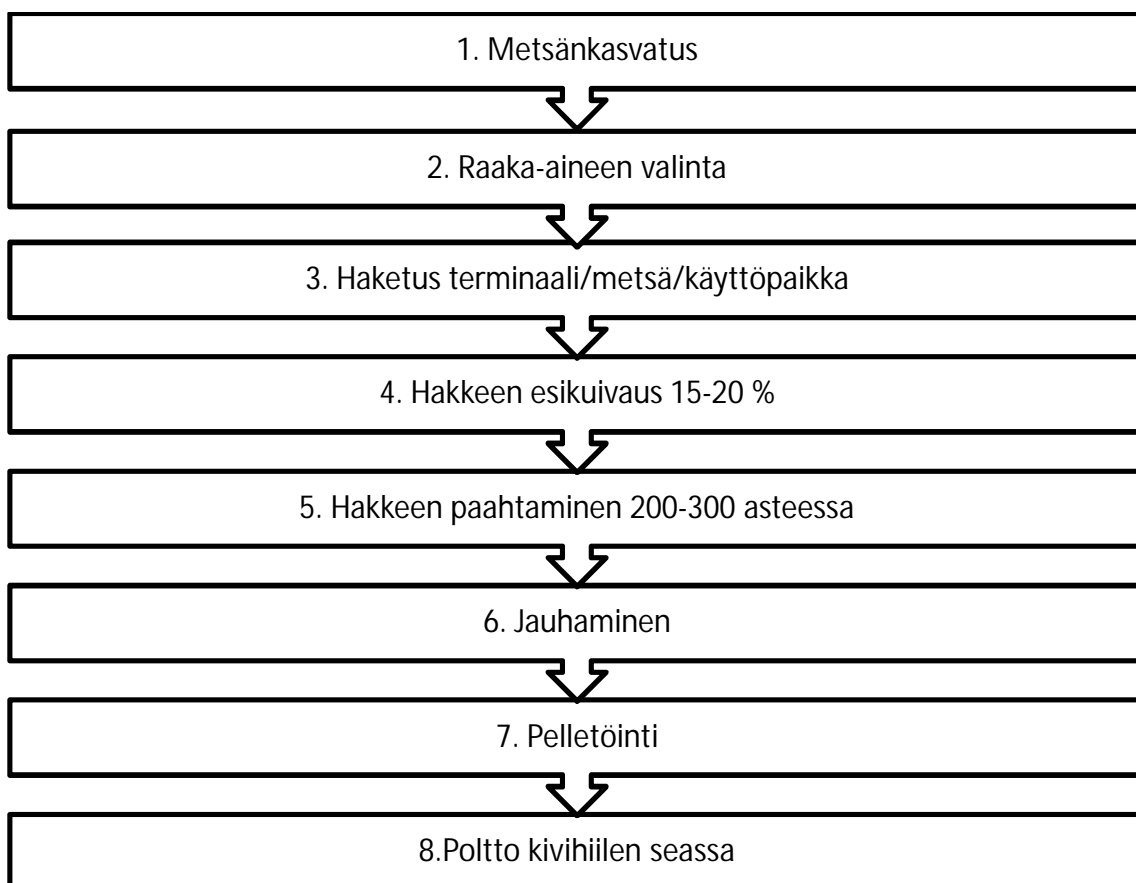
Torrefiointitekniikka on ollut tiedossa jo 1930-luvulta lähtien, mutta kaupalliseen tuotantoon top-pellettiä ei tiettävästi ole valmistettu. Torrefiointikoelaitoksia on rakennettu ympäri maailmaa, ja torrefiointitutkimuksia tehdään paljon. Hollanti on torrefioinnin edelläkävijämaa ja siellä Topell Energy -yhtiö on tehnyt yli 800 testiä torrefionnista (Topell Energy 2012). Metso Oy on myös bioenergia-alan edelläkävijä, joka on suunnitellut torrefiointilaitosta Ruotsiin. (Metso 2010). Miktech Oy on suunnittelemassa Suomeen ensimmäistä biohiilipelletin tuotantoa Ristiinaan (Miktech 2012).

Torrefioitua polttoainetta voidaan valmistaa kasvi- ja puuperäisestä biomassasta, koska kumpikin koostuu suurimmaksi osaksi samanlaisesta rakennusaineesta, selluloosasta. Tämä tarkoittaa sitä, että materiaali muutokset ovat myös samanlaiset, mutta käsittelyolosuhteet on testattava kummallakkin raaka-aineelle erikseen. (Bergman & Kiel 2005c, 5.)



Kuva 7. Torrefioitua raaka-ainetta (Kuva: Simo Kuittinen.)

Seuraavassa kuviossa 3 on esitetty top-pelletin valmistuksen eri vaiheet yksinkertaistettuna. Pelletin valmistus ei ole ainoastaan pelletin puristamista, jonka lopputuotoksena on noin 10–30 mm pitkä biomassasta puristettu pelletti. Pelletin valmistus vaatii useiden asioiden tuntemista. Pelletin tekeminen on vaativaa ja jopa samanlaisella kalustolla tehty pelletti voi lopulta olla erilaista.



Kuvio 3. Top-pelletin tuotantoketju. (Simo Kuittinen)

Pelletin valmistus alkaa siis jo metsästä ja metsänkasvatuksesta. Seuraavaksi valitaan sopivat puulajit, joista pellettiä halutaan tehdä. Puun varastoinnin jälkeen siitä poistetaan puuhun kuulumattomat partikkelit: kivet, rauta yms., jotta puhdas puu voidaan hakettaa ja jotta lopputuote on oikeanlaatuista. Haketettua puuta esikuivataan noin 15–20 % kosteuteen, jotta itse torrefiointi olisi mahdollisimman energiaomavaraista. (Obernberger & Thek 2010, 107.) Raaka-aineen ollessa kosteampaa kuin 20 % tarvitaan itse torrefiointiin ylimääräistä energiaa (Bergman, Boersma, Zwart & Kiel 2005a, 40).

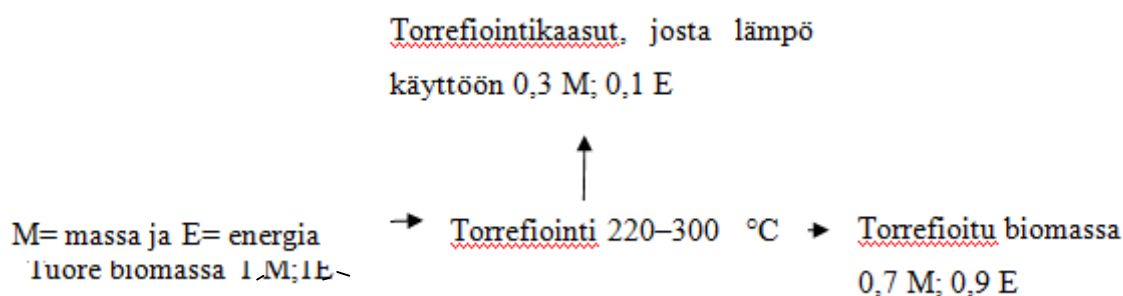
Biomassan paahtamista kutsutaan torrefioinniksi. Hake paahdetaan vähitellen 200–300 celsiusasteeseen. Varsinainen torrefiointi alkaa, kun lämpötila on 200 astetta (Bergman ym. 2005a, 17). Tavoitelämpötila saavutetaan siten, että lämpötilaa nostetaan tasaisesti 50 °C/min vauhdilla (Bergman 2005b, 11–13). Paahtamisen jälkeen hakkeesta tehdyn biomassan väri muuttuu tummanruskeaksi. Puuta kuivattaessa puu käyttäytyy eri lämpötiloissa eri tavalla. Paahtaminen tapahtuu osittain energiaomavaraisesti, koska paahtamisessa syntyneitä kaasuja voidaan polttaa ja polttamisesta saatua lämpöä

voidaan hyödyntää seuraavan erän paahtamiseen. Tällöin haihtuvien aineiden palaminen täytyy tapahtua optimaalisesti ja koko prosessin on oltava toimiva. Lisäksi kuivaamiseen/paahtamiseen voidaan tarvita ylimääräistä energiaa, jotta se onnistuu varmasti. Ylimääräinen energia on mahdollista saada esimerkiksi polttamalla käsittelemätöntä biomassaa, kuten puuhaketta tai maakaasua. (Schorr, Muinonen & Nurminen 2012, 3.)

Alla on esitetty torrefioinnin kannalta tärkeät lämpötilat:

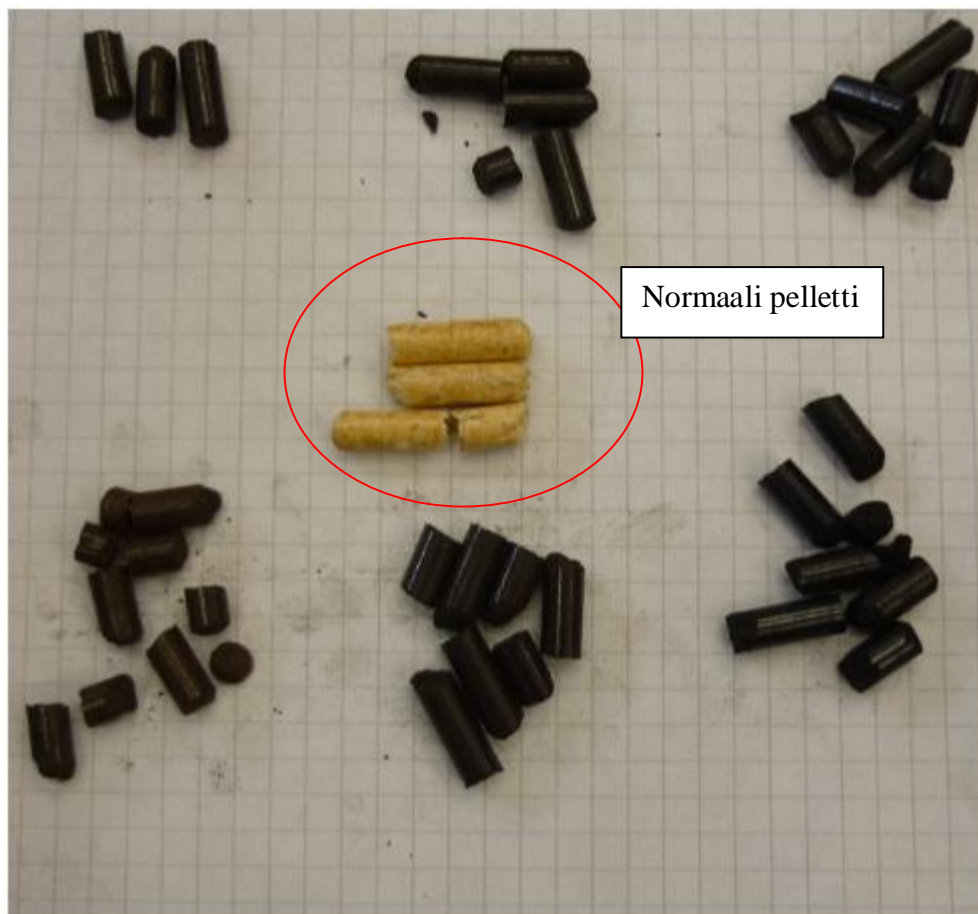
- 100–200 °C, veden höyrystyminen alkaa ja vesi poistuu puusta
- 200–280 °C, hemiselluloosa kasaantuu ja kemiallisissa sidoksissa ollut vesi ja helpoiten haihtuvat aineet vapautuvat
- yli 280 °C, kaikki haihtuvat aineet poistuvat raaka-aineesta ja tapahtuu hiiltymistä. (Hämäläinen & Heinimö 2006, 10.)

Paahtaminen tapahtuu hapettomassa tilassa. Paahtamisen aikana hake menettää massastansa erilaisina kaasuina noin 30 % ja energiasta noin 10 %. Toisin sanoen 70 % massasta on jäänyt jäljelle kiinteään muotoon ja se sisältää 90 % lähtöaineen lämpöarvosta. Haihtuvat aineet ovat pääasiassa happea ja vetyä, joten hakemassan energiasisältö kasvaa massaa kohti, koska massa sisältää enemmän palavaa ainesta. (Bergman 2005b, 13–15.) Alla esitetyssä kuvassa 8 näkyy, mitä biomassalle tapahtuu torrefioinnissa.



Kuva 8. Biomassan energian ja massan muutos torrefioinnissa (Kuva: Bergman 2005b, 13.)

Paahtamisen jälkeen hake jauhetaan. Jauhatukseen kuluu nyt vähemmän energiaa verrattuna normaalin purun tai kutterin jauhamiseen kuluvaan energiaan. Energiaa kuluu vähemmän, koska torrefioitu biomassa on hauraampaa. (Bergman 2005b, 16.) Kohdassa 6 tapahtuu puristaminen, jolloin pelletti saa lopullisen muotonsa. Raaka-aine pakotetaan joko tasomatriisin eli reikälevyn tai rengasmatriisin läpi. Pelletin lopullinen kosteus on alhainen noin 1–6 % riippuen mm. missä lämpötilassa torrefiointi on raaka-aineille tehty (Bergman 2005b, 13). Lopuksi pelletti jäädytetään ja siitä irrotetaan hienoaines pois. Puristusvaiheessa pehmennyt ligniini jäähtyy ja antaa pelletille kiiltävän pinnan sekä pitää pellettiä kasassa. (Flyktman, Kärki, Hurskainen, Helynen & Sipilä 2011, 29.) Kuvassa 9 on valmiita top-pellettejä.



Kuva 9. Tummanruskeita top-pellettejä (Kuva: Simo Kuittinen)

Viimeisenä vaiheena on torrefioidun pelletin kuljettaminen laitoksille, joissa sitä käytetään esimerkiksi kivihiilen seassa. Torrefioidun puun ja kivihiilen ominaisuudet

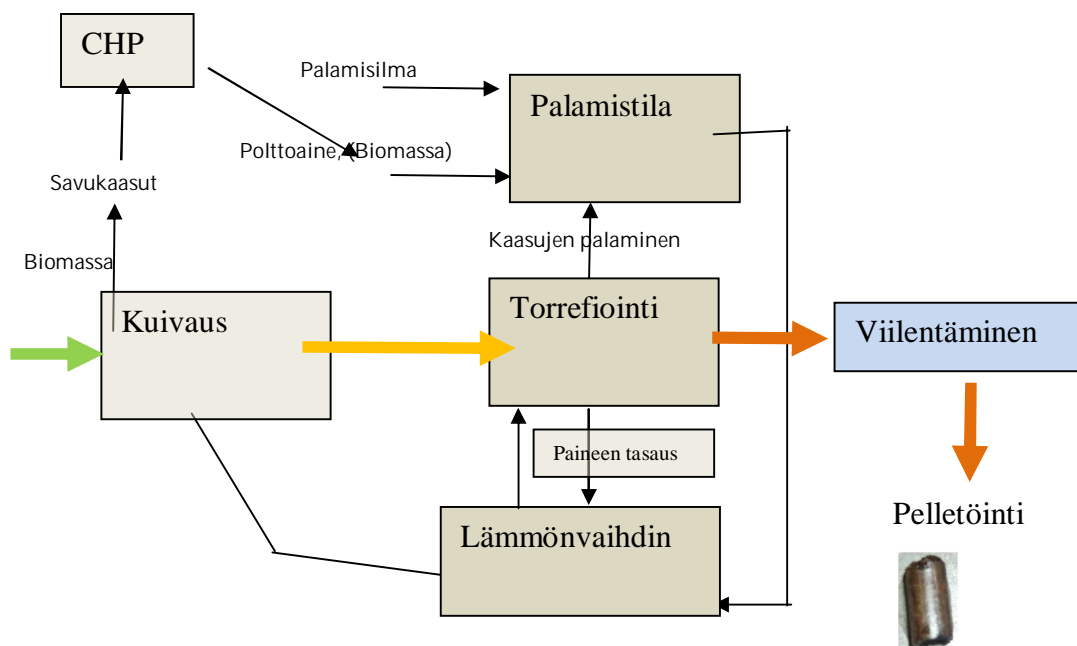
ovat niin lähellä toisiaan, että myös torrefioitua pellettiä voi jauhaa ja polttaa kivihiilivoimalaitoksissa ilman, että niihin joudutaan tekemään muutoksia (Agar 2010, Riikilä 2010, 1 mukaan). Torrefioidun pelletin oletetaan soveltuvan parhaiten bitumisen kivihiilen kanssa poltettavaksi (Schorr ym. 2012, 4). Laadukkainta kivihiiltä on antrasiitti, jonka energia-arvo on 35 MJ/kg. Toiseksi parhainta on bituminen ja subbituminen kivihiili ja huonolaatuisinta ruskohiili eli ligniitti, jonka energia-arvo on vain 8,3 MJ/kg. (Klemola 2011, 8.)

Torrefiointia voi tehdä käyttöpaikalla, jossa voi myös polttaa tuotteen edelleen energiaksi. Tällainen toiminto vaatii tehtaan ympärille huomattavat alueet, joissa säilyttää raaka-ainetta. Liikkumistilan lisäksi torrefiointiprosessin ja muun lämmöntuotantoprosessin yhteensovittaminen ei saa aiheuttaa lämmön- tai sähkönjakeluun epävarmuustekijöitä. Toinen vaihtoehto on tehdä torrefiointia siirrettävällä kalustolla. Tässä vaihtoehdossa kuorma-auton lavalla oleva torrefiointilaitteisto voidaan ajaa sinne, missä raaka-ainetta on saatavilla. (Schorr, Muinonen & Nurminen 2012, 30–31.) Idea on lähtenyt liikkeelle Kanadasta, mutta myös Suomessa Raussi-yhtiöt ovat kehittäneet puuhiilen valmistukseen laitteiston, jota kuljetetaan kuorma-auton mukana (ks. Raussi-yhtiöt 2012).

Kolmas vaihtoehto valmistaa torrefioitua polttoainetta on sen jalostaminen pelletiksi. Top-pelletin valmistus tapahtuu siellä, missä on runsaat raaka-ainevarat. Jalostettu top-pelletti on kannattavaa kuljettaa kauempaakin, koska se sisältää runsaan energiatiheyden noin 4,5 MWh ja suuren irtotiheyden noin 750–850 kg/i-m³. (Schorr ym. 2012, 30–31.)

3.4 Torrefiointimenetelmät

Kuivatulle biomassalle torrefiointia voidaan tehdä joko suoralla tai epäsuoralla kytkennällä. Menetelmissä biomassaa saavuttaa lopullisen tilansa. (Bergman ym. 2005a, 26.)



Kuva 10. Suoran kytkennän torrefiointiprosessi
(Kuva: Bergman ym. 2005a, 28.)

Bergmanin ym. (2005a, 28) mukaan suorassa kytkennässä hyödynnetään biomassasta haihtunutta kosteutta, joka muuttuu tulistuneeksi höyryksi ja kuivaa biomassaa lämmönsiirtimien avulla. Torrefioinnista vapautuvat kaasut poltetaan palamistilassa ja sieltä saatava lämpö hyödynnetään esikuivaukseen sekä itse torrefiointiprosessiin. Itse torrefiointitapahtumasta on mahdollista saada energiaomavarainen, mutta esikuivaus tarvitsee lisäenergiaa, jos biomassan kosteus on yli 20 %. Energiaomavaraisuutta on mahdollista saada lisää sijoittamalla esikuivaus lämmön- ja sähköntuotantolaitoksen (CHP) yhteyteen. Tällöin kuvassa 10 esitetyt savukaasut on mahdollista johtaa CHP-tuotantoon ja vastaavasti CHP-tuotannosta tuoda savukaasuja biomassan esikuivaukseen. Paineentasauksella varmistetaan se, että prosessissa ei aiheudu

vaaratilanteita kaasuja kierrätettäessä. Esikuivauksen lämpötilan säätelemisellä ja käytetyllä ajalla vaikutetaan lopullisiin biomassan ominaisuuksiin. (Bergman ym. 2005a, 26–29.)

Epäsuorassa kytkennässä biomassaa ympäröivissä seinissä kulkeva öljy toimii lämmön johtimena ja aiheuttaa torrefioinnin. Epäsuora kytkentä ei vaadi paineenpitoyksikköä, koska kaasut, jotka syntyvät torrefioinnissa, eivät kierrä reaktorin läpi, vaan menevät suoraan polttoon. Epäsuora kytkentä ei ole niin tehokas kuin suoran kytkennän periaate, koska suoraa kosketusta ei tapahdu biomassan ja lämmönsiirtäjäaineen välillä. (Bergman ym. 2005a, 26–29.)

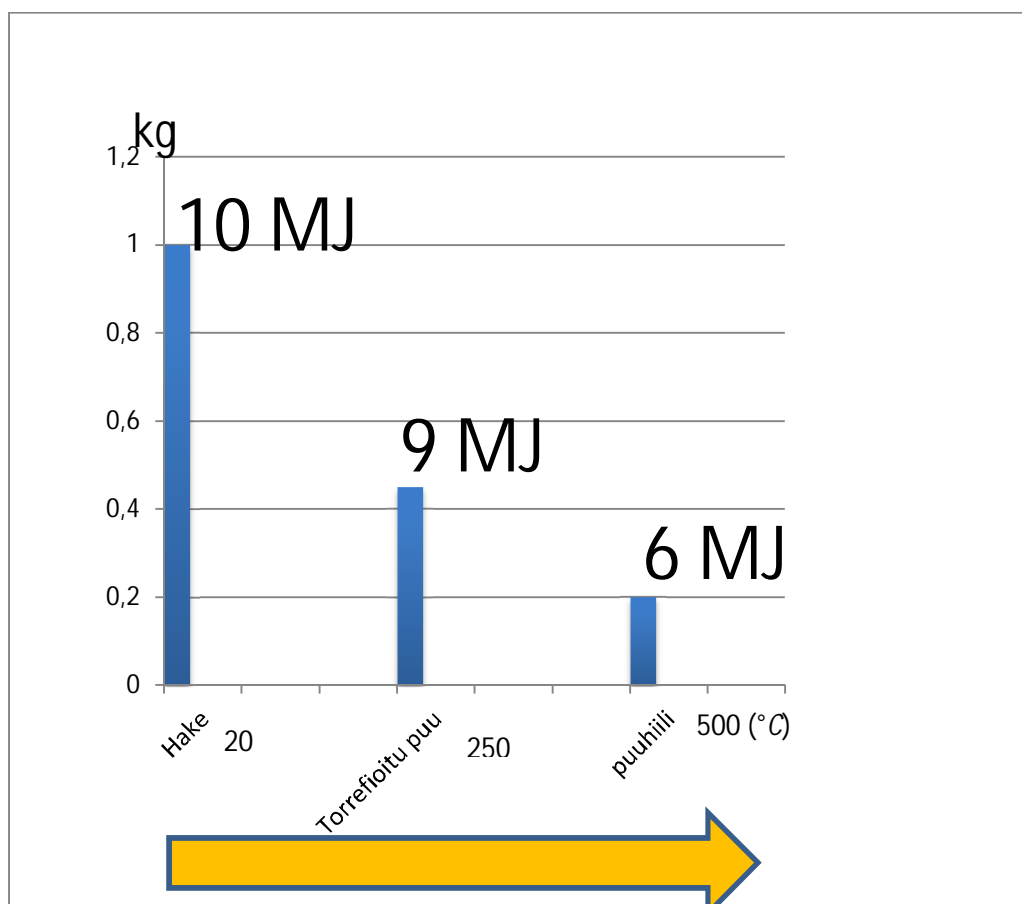
Hollantilainen yhtiö on kehittänyt Torbed reactor-nimisen laitteen, jolla voidaan myös tehdä torrefiointia. Biomassa tulee esikuivata noin 20 % kosteuteen, minkä jälkeen tapahtuu itse torrefiointi 1–3 minuutissa. Käsiteltävän biomassan partikkelikoko voi vaihdella, ja biomassan raaka-ainevalikoima on hyvin laaja. (Topell Energy 2012.) Lämpötila torrefioinnissa on 320–330 astetta. Torrefioinnin jälkeen massa jäähdytetään ja vasta sitten pelletöidään. Valmis pelletti tulee ulos noin 90–100-asteisena. Laitteen toiminta perustuu reaktiokammiossa pyörivään nopeaan kaasuvirtaukseen. Torbed reactor -laitteella on saatu pellettejä, jotka ovat energiasisällöltään keskimäärin 6,1 kWh/kg. (Obernberger & Thek 2010, 108.)

3.5 Top-pelletin käyttömahdollisuudet

Uusiutuvan energian lisäämistavoitteet vaikuttavat automaattisesti lämmön- ja sähköntuotantoon eli CHP-voimalaitoksiin. Suomessa uusiutuvaa energiaa tulisi lisätä vuodesta 2005 vuoteen 2020 mennessä 38 %. Tavoitteena on niin ikään vähentää kivihiilen käyttöä ja korvata se uusiutuvilla biomassoilla sekä lisätä Suomen energiahuollon omavaraisuus astetta. Kivihiilivarastot olivat 80 % suuremmat vuonna 2012 kuin edellisinä vuonna (Tilastokeskus 2012) Poltettaessa biomassaa on hyvä huomioida, ettei vettä kannata polttaa. Kosteaa biomassaa antaa huomattavasti pienemmän energia-arvon kuin kuiva biomassaa. Kosteus siis vähentää biopolttoaineesta saatavaa lämpöarvoa. Puuaineksen kosteuden ollessa 50 % on tehollinen lämpöarvo 8,2 MJ/kg. Puuaineksen kosteuden ollessa 20 % on tehollinen lämpöarvo 14.5 MJ/kg ja kosteuden

ollessa 0 % on puuaineksen tehollinen lämpöarvo 18,7–20 MJ/kg. (Haikonen 2005, 13.) Kuivaa biomassaa poltettaessa tarvitaan itse polttoainetta saman energiamäärän saavuttamiseksi vähemmän kuin märkää raaka-ainetta poltettaessa. Energiamäärän kasvaminen kuivan polttoaineen myötä vähentää niin ikään jalostetun biomassan kuljetusmäärää. Loppukäyttäjän kannalta on myös tärkeää, että biopolttoaine on tasalaatuista ja mahdollisimman kuivaa. Tarkasteltaessa puun kuivaamista suhteessa energiasisältöön kannattaa huomioida missä lämpötilassa puuta kuivaa.

Puun kuivaamisella on yhteys puun luovuttamaan energiasisältöön ja massaan. Esim. puun kosteuden ollessa 35–45 % ja lämpötilan ollessa 20 astetta yksi kilogramma puuta antaa 10 MJ energiaa. Torrefioitaessa puuta 250 asteen lämmössä puun kosteus on 0 % ja energiasisältö 9 MJ/450 g. Lämpötilan noustessa 500 asteeseen puusta tulee puuhiiltä, jonka kosteus on 0 % ja massa on 0,2 kg. Tällöin puuhiilen energia-arvo on 6 MJ. (Agar 2010, Riikilä 2010, 1 mukaan).



Kuva 11. Puun kuivumislämpötilan suhde painoon sekä energia-arvoon (Kuva: David Agar 2010.)

Palaessa huonolaatuiset polttoaineet voivat lisätä laitoksen rakenteissa korroosiota, eroosiota ja päästöjä. Huonolaatuisella polttoaineella tarkoitetaan tässä tapauksessa polttoainetta, joka on kosteaa (huono lämpöarvo) ja jolla on suuri tuhkapitoisuus, epätasainen palakoko ja rakenne. Huonolaatuisessa polttoaineessa ei-toivottujen kemikaalien määrä on runsas. Kemikaalit haittaavat ympäristöä sekä polttolaitteita. Kloorikaasut ovat ongelmana tulistinputkille, mutta seospoltossa, esimerkiksi käytettäessä kivihiiltä ja puuta, alkalit sulfaoituvat ja kloori vapautuu kloorivedyksi ja kulkeutuu savukaasuina pois eikä ole tällöin haitallinen. (Makkonen 1996, 3–6.)

Kivihiilipölykattiloita on toiminnassa Suomessa kuudessa kaupungissa. Kaupungit ovat Helsinki, Vantaa, Espoo, Lahti, Naantali sekä Vaasa. Laitokset on rakennettu 60–80-luvulla. 80-luvun jälkeen rakennetut CHP-laitokset hyödyntävät leijukerroskattilatekniikkaa, joka mahdollistaa rinnakkaispolton. Rinnakkaispoltolla tarkoitetaan kivihiilen ja biopolttoaineiden rinnakkaispolttoa (VTT tiedotteet 2011). Suomessa CHP-laitokset käyttävät kivihiiltä noin 14 TWh. Rinnakkaispolttoa voidaan tehdä epäsuoralla poltolla ja suoralla poltolla. Epäsuorasta yhteispoltosta vapautuvat kuumat höyryt ahdetaan saman turbiinin lävitse tuottamaan energiaa. Kiinteä biomassa muuttuu kaasumaiseen tai nestemäiseen muotoon, minkä jälkeen se poltetaan yhdessä pääpolttoaineen kanssa. Suorassa seospoltossa jauhettu biopolttoaine syötetään yhdessä kivihiilen kanssa kivihiilipolttimin tai vastaavasti biopolttoaine poltetaan omissa polttimissa. Suora seospoltto on epäsuoraa polttoa yleisempi. Maailman kivihiilivoimaloista 90 % on hiilipölykattiloita ja noin 10 % leijupetikattiloita. (Schorr ym. 2012, 4.)

Leijupetitekniikassa polttoainetta syötetään hiekkapetiin, jota leijutetaan alta puhallettavalla ilmalla. Tyypillinen leijukattiloiden petilämpötila on noin 800–900 astetta. Kuuman hiekan sekaan lisätään polttoainetta, jolloin tapahtuu polttoaineen kuivuminen sekä palaminen. (Makkonen 1996, 1–6.) Leijutekniikka on peräisin 60-luvulta. Leijupoltossa voidaan polttaa lähes mitä tahansa palavaa materiaalia, jolla on lämpöarvo. Leijupoltossa raaka-aineella ei ole palamisen kannalta tiukkoja raja-arvoja. Esimerkiksi polttoaineen palakoolle ja rakenteelle ei aseteta samanlaisia rajoja kuin pölypolttokattiloille. Palaminen on hallittua, ja polttoainetta ei ole tarpeen esikuivattaa ennen polttamista. Suosituin poltettava raaka-aine on leijupoltossa kivihiili.

Leijukattilassa palaa lähes mikä tahansa, mutta kaupallisessa mielessä on poltettavalla raaka-aineella loppujen lopuksi suuri merkitys. (Makkonen 1996, 1.)

Pölypoltolla on mahdollisuus saada aikaiseksi suurempi sähköteho kuin leijupetikattilalla. Pölypolttokattiloiden polttoaine on tyypillisesti kivihiiltä, mutta niissä voi polttaa hienoksi jauhettuna myös turvetta sekä puuta. Kivihiiltä poltetaan hienojakoisena jauheena. Hienojakoinen partikkeli palaa leijukerros polttoa suuremmalla teholla, koska hienojakoinen pöly palaa nopeasti sekä saavuttaa korkeamman lämpötilan, noin 1500–1700 astetta. (Ohlström 1998, 23.)

Biomassoilla on mahdollisuus korvata kivihiiltä enintään 5 % polttoaineiden kokonaisenergiasta. Sahanpurun syöttö pölypolttokattiloihin onnistuu ilman merkittäviä investointeja tai lisääntyviä käyttökustannuksia. Pelleteillä kivihiiltä voidaan korvata noin 15 %. Puulinjalla korvaavuus on noin 30 %. Puulinjastolla tarkoitetaan polttoaineen vastaanottoa, haketusta tai murskausta pieneen palakokoon. Lisäksi puulinjastossa on erillinen polttoaineen kuivaus ja erilliset syöttölinjat hienojakoista biopolttoainetta käyttäville polttimille. (Flyktman ym. 2011, 4.)

Torrefioidulla pelletillä arvioidaan pystyttävän korvaamaan kivihiiltä jopa 50 % (Flyktman ym. 2011, 4). Torrefioitu pelletti soveltuu poltettavaksi pölypolttokattiloissa, koska se on tasalaatuista ja kuivaa, kuten kivihiili ja sillä on lähes sama energiatiheys kuin kivihiilellä. Torrefioitu pelletti soveltunee siis seospolttoon samanaikaisesti kivihiilen kanssa. Biopolttoaineen ollessa homogeenistä ja polttoaineen saatavuuden ollessa varmaa huoltotarve vähenee sekä korvaavia polttoaineita ei tarvita niin paljon, ja hiilidioksidipäästöt vähenevät. (Agar 2010, Riikilä 2010, 1 mukaan). Helsingin energian tavoitteena vuonna 2020 on saavuttaa energiantuotannosta 20 % uusiutuvalla energialla. Hanasaaren ja Salmisaaren voimalat ovat varautuneet siirtymään 40 % biopolttoaineen osuuteen vuoteen 2020 mennessä. (Makkonen 2012, 4.)

Kosteus ja lämpöarvo kulkevat käsi kädessä. Mitä suurempi polttoaineen kosteus on, sitä vähemmän se luovuttaa energiaa. Lisäksi kosteaa polttoainetta joudutaan polttamaan enemmän, jolloin syntyy myös päästöjä ja tuhkaa enemmän. Leijupetikattiloiden suurimpia ongelmia ovat tuhkan liimautuminen petipartikkeleihin. Epätasainen palakoko ja rakenne voi aiheuttaa sen, että kappale ei ehdi palaa halutussa

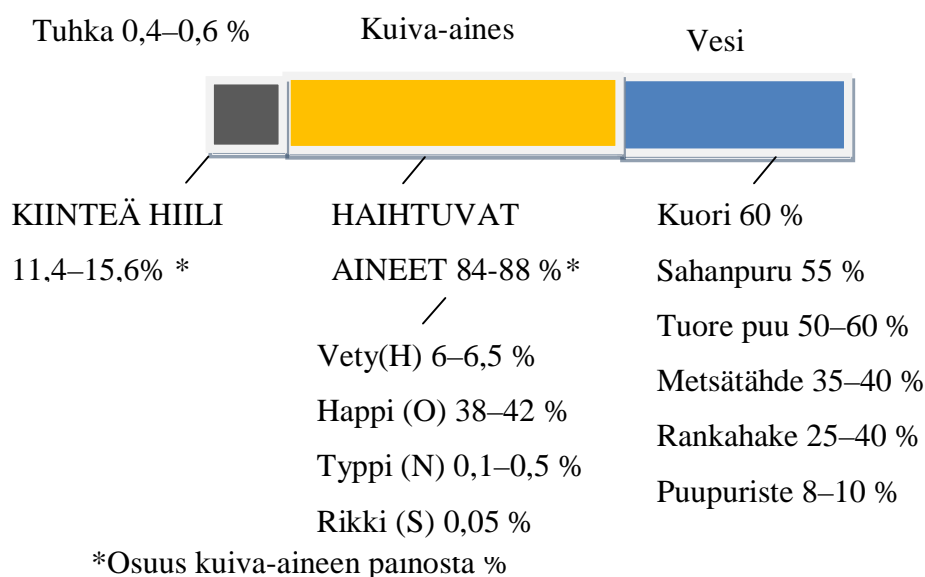
paikassa ja kulkeutuu palamisvyöhykkeeltä pois aiheuttaen hiilidioksidipitoisuuden kasvua. Edellä mainittu ilmiö aiheuttaa ongelmia enemmän pölypolttokattiloissa kuin leijupedissä. (Makkonen 1996, 36.)

3.6 Puun koostumus ja ominaisuudet

Puun ominaisuuksiin vaikuttavat kasvupaikkatyyppi sekä kasvuolosuhteet ja maantieteellinen sijainti. Etelä-Suomessa puut kasvavat nopeammin verrattuna Pohjois-Suomeen, ja tästä johtuen pohjoisen puut ovat tiheäsisimpiä ja sisältävät enemmän uuteaineita. Yleisesti runkopuun kuiva aine sisältää selluloosaa 40 %, hemisellulooseja 20–30 %, ligniiniä 20–30 %, ja uuteaineita 5 % (Vanninen 2009, 5). Kuori sisältää samoja ainesosia kuin runkopuu, mutta kuoren uuteainepitoisuus voi olla jopa 30–40 %. (Rouvari 2005, 10.) Kuoressa on sitä vastoin vähemmän ligniiniä, noin 10–25 % (Vanninen 2009, 10.) Kuori sisältää useasti myös metalleja tai muita haitallisia aineita, jotka lisäävät palamisen jälkeistä tuhkan määrää. Haitallisia aineita ovat muun muassa magnesium, kloori ja rikki. (Schorr ym. 2012, 20–21.)

Torrefiointikaasut sisältävät orgaanisia aineita mm. happoja sekä tervaa. Suurin osa näistä yhdisteistä poltetaan jälkipoltossa, mutta vaarana on, että terva kondensoituu johonkin laitteen osaan ja aiheuttaa käyttökatkoja. Tervoja muodostuu sitä enemmän, mitä suurempi lämpötila on kyseessä. (Kleinschmit 2011, 7.)

Biomassa koostuu kolmesta eri osasta: palavasta aineesta eli kuiva-aineesta sekä hiilestä ja vedestä. Hiili, vety ja typpi ovat pääasialliset alkuaineet, jotka hapen ohella palamisreaktiossa vapauttavat energiaa. (Kokkonen & Lappalainen 2005, 27.) Palamattomia aineita ovat vesi ja tuhka. Puussa on vettä jopa 60 %. Tuhkaa on alle 1 %, ja loppuosa on kuiva-ainesta, joka luovuttaa palaessaan energiaa (kuva 12).



Kuva 12. Puun koostumus (Kuva: Alakangas 2000, 35)

Puussa on myös uuteaineita, jotka pehmentävät raaka-ainetta ja toimivat voiteluaineena pelletöinnissä. Pehmentyneet uuteaineet vähentävät energiankulutusta, mutta todennäköisesti pehmentyneet uuteaineet myös heikentävät pelletin lujuutta. (Nielsen, Gardner & Felby 2010.) Uuteaineen vähentämistä voidaan saavuttaa käyttämällä lipaasientsyymejä jauhatuksen jälkeen tai käyttämällä elävää sientä hakkeen varastoinnin aikana. (Fisher ym. 1994, 1.)

3.6.1 Ligniinipitoisuus

Lehtikankaan (2001, 352) tutkimuksessa kerrotaan, että ligniinipitoisuuden kasvaessa pelletin lujuus paranee. Uuteainepitoisuuden olemassa olon epäillään vähentävän selluloosasidosten kosketuspintaa, joka puolestaan heikentää pelletin lujuutta. Puun lahoaminen/lahottaminen vähentää saantoa, koska lahotessa ligniinin määrä vähenee. (Seppälä 1999, Seppänen ym. 2008, 15 mukaan.) Tuore raaka-aine antaa pelletille paremmat lujuusominaisuudet. Kuivan mäntysahanpurun pitkävarastointi noin 12 viikkoa on lisännyt pelletin irtotiheyttä sekä kestävyyttä (Oberberger & Thek 2010, 146). Lehtikankaan (2001, 352, 356) mukaan kuoreissa on huomattavia määriä ligniiniä ja sen takia poltettaessa tulee myös suuri lämpöarvo. Hän kertoo myös, että kuoresta

tehdyt pelletit ovat lujempia kuin purusta tehdyt pelletit. Vannisen (2009, 16) mukaan kuori sisältää ligniiniä vähemmän kuin puuaines.

”Ligniinipitoisuus ei kuitenkaan yksin pysty selittämään pellettien lujuuksia.” (Filbakk 2010) on havainnut, että puhtaiden mäntypuru ja -kuoripellettien lujuus oli pienempi kuin puhtaiden mäntykuoripellettien, vaikka männynkuori sisältää ligniiniä enemmän kuin männyn puru. (Hyrkäs 2010, 16.) Sellusta valmistetun paperin ominaisuudet sitä vastoin heikkenevät, mitä enemmän siinä on ligniiniä (Tarek ym. 2011, 9, Ek & Gellerstedt & Henriksson 2009, mukaan.)

Havupuiden oksat antavat paremman lämpöarvon kuin rungon puuaines. Tämä selittyy sillä, että oksiin muodostuu lylyä, joka sisältää normaaliin puuhun verrattuna paljon enemmän ligniiniä. Lämpöarvoltaan ligniini on selluloosaa ja puun sisältämiä muita hiilihydraatteja korkeampi. Oksissa on myös enemmän uuteaineita, jotka lisäävät saatavaa lämpöarvoa. Havupuiden oksien kuoreissa on puolestaan oksien puuainetta korkeampi lämpöarvo (Kärkkäinen, 2003 236–238, Föhr 2008, 18.) Havupuissa on enemmän ligniiniä ja uuteaineita kuin lehtipuissa. Ligniini ja uuteaineet sisältävät vetyä ja hiiltä, jotka tuottavat palaessaan lämmön. Mitä enemmän palavia alkuaineita on, sitä suurempi on polttoaineesta saatava lämpöarvo. Happi ja typpi sitä vastoin alentavat lämpöarvoa. (Kokkonen 2005, 27.) Lisäksi kuorettoman hakkeen poltossa typpipitoisuus on pienempi verrattuna kuorellisen hakkeen typpipitoisuuteen (Wihersaari & Palosuo 2000, 27).

3.6.2 Tuhka

Biopolttoaineet sisältävät tyypillisesti tuhkaa muutamia prosentteja, mutta huonolaatuinen kivihiili voi sisältää tuhkaa jopa 30–50 %. Suomessa käytettävä kivihiili sisältää tuhkaa noin 10 % riippuen siitä, mistä maasta tuhka on peräisin ja kivihiililajiketta käytetään. (Alakangas 2000, 183.)

Puulajit ja puun eri osat sisältävät tuhkaa toisistaan poikkeavasti (Vanninen 2009, 3). Myös eri kivihiililajit sisältävät tuhkaa eri määriä. Tuhka vähentää raaka-aineesta saatavan tehollisen lämmön määrää, koska tuhka ei palaessaan luovuta energiaa. Tuhka lisää myös kattiloiden puhdistustarvetta. Jos kattilaa ei puhdisteta, heikkenee kattilasta saatavan tehon määrä. Tuhkan kemiallisella koostumuksella on suuri merkitys siihen, liimautuuko tuhka sulaessaan petimateriaalin pinnalle tai lentotuhkana lämmönvaihdinpinnoille aiheuttaen molemmissa tapauksissa ongelmia kattilalaitoksille. Suuri tuhkan määrä voi lisätä sintraantumista, mutta ongelmia syntyy lähinnä pienillä laitoksilla. (Hyrikäs 2010, 13, Filbakk 2010 mukaan.) Useiden biopolttoaineiden tuhka voi aiheuttaa tulipesään ja kattilaan eroosiota. Sen sijaan kotimaiset turpeet sitovat alkaleja, jotka puolestaan vähentävät tuhkan liimautumista petipartikkeleihin. (Makkonen 1996, 5.)

Hakkutähteiden välivarastointi lisää tuhkapitoisuutta. Peittämättömissä hakkuutähteissä tuhkapitoisuus nousi jopa 3,5 prosenttiin. (Föhr 2008, 14, Nurmi 1999 mukaan). Tuhkaa voidaan hyödyntää metsänlannoittamiseen. Suurissa laitoksissa tuhkaa syntyy paljon ja monessa tapauksessa tuhka on järkevää jalostaa rakeeksi ennen sen kuljettamista metsään. Rakeistaminen toki tuottaa lisäkustannuksia, joten joissakin tapauksissa tuhkaa käytetään rakennusmateriaalina esimerkiksi meluvallina. Torrefioitujen pelletin ja hiilen poltosta syntyy niin ikään tuhkaa, mutta epäpuhtauksien takia se ei sovellu laitettavaksi metsän lannoitustarpeeseen. (Wihersaari & Agar 2010, 442.) Puhdasta hiilituhkaa käytetään sementtiteollisuudessa ja muissa maansiirtotöiden täyteaineena. Betonia valmistettaessa muuta tuhkaa kuin kivihiilituhkaa saa olla 10 %. (Flyktman, ym. 2011, 44.)

4 Tutkimuksen tarkoitus

Opinnäytetyö käsittelee case-tapauksena Ilomantsin pellettitehdasta. Ilomantsissa sijaitseva Vapo Oy:n omistama pellettitehdas on lopettanut toimintansa, koska 70 000 tonnia vuodessa tuottanut pellettilaitos on osoittautunut kannattamattomaksi. Peruspelletin ylituotanto maailmanlaajuisesti on heikentänyt pelletin kannattavuutta. Energiantuottajat asettavat uusiutuvalle energialle samat perusedellytykset kuin fossiilisille polttoaineille. Uusiutuvan energian tulee täten olla asiakkaan näkökulmasta katsottuna taloudellisesti kannattavaa. Laitoksissa käytettävän polttoaineen on oltava kohtuuhintaista, sitä on oltava riittävästi saatavilla pitkälläkin aikavälillä, ja sen on sovelluttava energiantuottajan kattiloihin.

Opinnäytetyön pääpaino on tutkia laboratoriossa pelletöintikokein eri asteessa torrefioituja hakepaloja, jotka jauhetaan ja puristetaan pelletiksi. Laboratoriokokeiden tarkoituksena on selvittää, miten eri lämpötiloissa torrefioidut hakkeet valmistuvat pelletiksi ja millainen raaka-aine sopii parhaiten torrefioitujen pellettien tekemiseen. Ominaisuuksia, joita pelletistä tutkitaan, esitetään alla olevassa taulukossa 2.

Taulukko 2. Top-pelletin tutkittavat ominaisuudet.

Raaka-aine	Paahdettu puu
Kovuus	Kg
Pelletin koko	Halkaisija mm, keskipituus mm
Energiasisältö	MWh/i-m ³
Kosteus	%
Tiheys	Kg/m ³
Irtotiheys	Kg/i-m ³
Tilantarve	m ³
Kulutuskestävyys, Irtoaineksen määrä	%

Pelletin tekohetkellä mitataan laitteistosta erilaisia arvoja. Laboratoriokokeista saatujen tuloksien sekä aikaisempien tutkimusten perusteella pohditaan, mikä olisi top-pelletin

€/MWh-hinta asiakkaan portille toimitettuna. Lisäksi selvitetään lähialueen raaka-aineen saatavuus ja sekä logistiikka valmiin tuotteen osalta.

Tässä tutkimuksessa vastataan kysymyksiin:

- Millainen hake soveltuu top-pelletin raaka-aineeksi ja millainen on raaka-aineen saatavuus?
- Millaiset ovat top-pelletin laadulliset ominaisuudet ja kuinka top-pelletti valmistuu?
- Mikä on top-pelletin hinta asiakkaan portille toimitettuna ja mistä hinta muodostuu?

5 Aineistot ja menetelmät

5.1 Torrefioidun metsähakkeen pelletöintikokeet

Työ on kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus, jota vahvistetaan laboratoriokokein. Laajoja teoksia torrefioidun puun pelletöinnistä on niukasti saatavilla, koska ala on uusi. Aiheeseen täytyi perehtyä useasta eri teoksesta ja koota näiden tietojen pohjalta riittävä aineisto päätelmien tueksi. Laboratoriokokeissa tutkittiin ulkomailta saatuja eri lämpötiloissa torrefioituja raaka-aineita. Torrefiointilämpötilana oli tutkimuksessa käytetty kolmea eri lämpötilaa. Tutkimuksen kohteena oli kahta eri raaka-ainetta, joiden puulajia/puulajeja ei ole tiedossa. Laskelmat tehdään yrityssalaisuuteen vedoten kirjallisuudesta saaduilla arvoilla. Torrefioitu hake jauhettiin Ilomantsin Mekrijärven tutkimuslaitoksella. Tummanruskeaa ja erittäin pölyävää torrefioitua raaka-ainetta pelletöitiin Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun tiloissa.

Laboratoriokokeilla on tarkoitus saada tukea kirjallisuudesta saaduille havainnoille. Lisäksi tuloksia verrataan aikaisempiin torrefiointikokeisiin. Torrefioituja raaka-aineita pelletöitiin Hylicpress MP60 -pelletinpuristimella. Jauhamiseen kulunutta

energiamäärää ei tässä työssä ilmoiteta, mutta jauhatuskokeen tehneen henkilön mukaan raaka-aineet jauhautuivat huomattavasti helpommin kuin torrefioimattomat raaka-aineet. Jauhatuksesta saatu kokemus on kirjallisuudessa esitettyjen tietojen kanssa yhtenäinen (ks. esim. Bergman 2005b, 16). Alla on kuva pelletinpuristinkoneesta.



Kuva 13. Hylicpress MP60 -pelletinpuristin (Kuva: Simo Kuittinen.)

Pelletin puristaminen aloitettiin koneen esilämmityksellä. Esilämmitykseen käytettiin sahanpurua ja kauraa. Kun lämpötilan oli sopiva lisättiin torrefioitua raaka-ainetta vähitellen. Lämpötila mitattiin matriisin kyljestä sähkökäyttöisellä mittarilla. Koneen saavuttaessa kulloisellekin raaka-aineelle optimilämpötila aloitettiin pelletin valmistaminen. Myös kierrosnopeutta säädettiin raaka-aineen mukaan. Hienojakoinen torrefioitu raaka-aine pölisi todella paljon ja pelletin tekijät joutuivat käyttämään työskentelytiloissa hengityssuojaimia.

Valmiit pelletit punnittiin, minkä jälkeen ne laitettiin kuivumaan uuniin (kuva 14). Jokaisesta erästä otettiin kaksi näytettä ja tulokseksi saatiin näytteiden keskiarvo. Uunin lämpötila oli 105 astetta standardin CEN/TS 14774-2 mukaisesti. Kuivauksen jälkeen koe-erän massan oletetaan olevan muuttumaton (Föhr 2008, 36). Kuivumisen jälkeen pelletit punnittiin uudelleen. Tällä menetelmällä saatiin selville torrefioitujen pellettien loppukosteus.



Kuva 14. Kuivausuuni (Kuva: Simo Kuittinen.)

Punnitukseen käytettiin digitaalivaakaa (kuva 15). Vaakaa käytettiin raaka-aineen tiheyden ja pellettien painon mittaamiseen sekä pellettien tiheyksien (kg/l-m^3) määrittämiseen.



Kuva 15. Tarkkuusvaaka (Kuva: Simo Kuittinen.)

Kulutuskestävyyttä mitattiin Cen-standardin mukaisesti rummutustestillä. Rummutustestiin mitattiin 500 g pellettiä. Pelletti laitettiin siivilään, jotta rummutustestiin ei tulisi jo olemassa olevaa hienoaainesta. Siivilästä pelletti laitettiin pyörimään 10 minuutin ajaksi rummutuslaitteeseen. Tämän jälkeen materiaali otettiin rummutuslaitteesta ja siivilöitiin uudelleen, jolloin saatiin eroteltua hienoaines pois. Tämän jälkeen alun perin olleen 500 g pellettierän paino mitattiin jälleen ja saatiin selville, kuinka paljon hienoainesta syntyi. Alla on kuva rummutuslaitteesta (kuva 16).



Kuva 16. Rummutuslaite (Kuva: Simo Kuittinen.)

Pelletin kovuus mitattiin Amandus Kahl -mittarilla (kuva 17). Yksittäinen pelletti laitettiin mittariin poikittain ja ruuvia kiristettiin, kunnes pelletti hajosi. Mittaustulos ilmenee kiloina.



Kuva 17. Amandus Kahl -mittari (Kuva: Simo Kuittinen.)

5.2 Raaka-aineen tuotantokustannusten laskenta

Metsäkone saa tulonsa kuutiotilavuuden mukaan. Nuorissa kasvatusmetsissä ei kuutiotilavuus ole suuri, ja niinpä harvennuspuille tulee suuri hinta puunteosta ja ajosta. Rinnankorkeudelta mitattuna alle 10 cm:n paksuus on korjuukustannuksiltaan noin 15–20 €/m³. Hakkuukertymän nouseminen energiapuuharvennuksissa 15 litrasta 30 litraan parantaa tuottavuutta ja laskee kokopuun tienvarsihintaa 25 %. Hakkuutyössä puun tilavuuden kaksinkertaistuminen parantaa tuottavuutta 40 % (Laitila ym. 2010, 91–92). Kun kuitupuun rungon keskitilavuus nousee 20 %, laskee käyttöpaikalla rankahakkeen hinta noin 3 % (Ihalainen & Niskanen 2010, 29). Alakankaan (2007, 16) mukaan karsinta on järkevää tehdä, kun puuston koko on 30–70 dm³. Tätä pienemmät puut kannattaa hakata kokopuumenetelmällä

Energiapuun haketus voidaan tehdä hajautetusti tai keskitetysti. Hajautetussa mallissa haketus tapahtuu teidenvarsilla. Keskitetyssä haketuksessa hakkuri on kiinteä ja hakettava materiaali kuljetetaan käyttöpaikalle. Käyttöpaikkahaketuksen etuina ovat suuri käsiteltävän raaka-aineen määrä sekä hakkurin ja muiden koneiden suuri käyttöaste. (Ihalainen & Niskanen 2010, 7.) Rankakuljetusta ajatellen puut kannattaa pätkiä tasamittaisiksi, jotta jatkokuljetus olisi tehokasta. Käyttöpaikkahaketus mahdollistaa myös suurten puskurivarastojen pitämisen, jolla voidaan helpottaa esimerkiksi kelirikkoaikana tapahtuvaa haketusta.

Ihalainen ja Niskanen (2010, 24) vertasivat metsäenergian tuotantoketjujen hinnanmuodostuksia toisiinsa. Edullisin hinta muodostui tuoreen latvusmassan haketuksesta käyttöpaikalla, kun kuljetusetäisyys oli 30–50 km. Kokonaiskustannukseksi muodostui 20,8 €/m³ (10,4 €/MWh). Kantomurskeen hinta oli 31,56 €/m³ (15,76 €/MWh), kokopuuhakkeen hinta noin 36 €/m³ (18 €/MWh) ja rankapuun hinta on noin 39 €/m³ (19,5 €/MWh). Kemera-tuet laskivat kokopuun ja rankapuun lopullista hintaa noin 11 €/m³. Tämänhetkinen tukipolitiikka on vielä epäselvä, mutta kokonaishinnaltaan latvusmassasta valmistettu hake pysyy edelleen halvimpana vaihtoehtona. (Ihalainen & Niskanen 2010, 24.) Latvusmassan edullisuus perustuu siihen, että latvusmassalle ei makseta juurikaan kantohintaa ja se voidaan kerätä osana muuta metsänkäsittelyä.

Raaka-aineen hintaan vaikuttavia tekijöitä

Alla esitetään raaka-aineen hintaan vaikuttavia tekijöitä. Taulukko 3. Raaka-aineen hintaan vaikuttavat tekijät. Taulukot perustuvat Ihalaisen ja Niskasen (2010) tekemään selvitykseen Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjussa.

Palstan ominaisuudet

- Palstan koko (ha), sijainti sekä maasto
- Kesä-/talvileimikko
- Puun järeys ja puulaji
- Oikean hakkuumenetelmän soveltaminen (kokopuu, ranka, jne.)

Polttotekniset ominaisuudet

- Biopolttoaineen laatu
- Kattilateknologia ja epäsuora-/suorapoltto
- Tuhkan käyttömahdollisuudet

Korjuukustannukset

- Korjuukaluston valinta puuston järeyden mukaan
- Hakatun puuaineksen jatkokuljetusmahdollisuus

Hallinnolliset ja muut vaikutukset

- Poliittiset päätökset hyödyntää ja tukea uusiutuvaa energiaa
- Raaka-aineen riittävyys (kilpailutilanne)
- Työntekijöiden riittävyys toimivaan tuotantoketjuun (metsästä loppukäyttäjälle)
- Metsänomistajan halukkuus myydä puuta
- Tuotantosopimuksien tekeminen kaikille osapuolille kannattavaksi (logistiikka, tuotanto, loppukäyttäjä)

6 Tulokset

Laboratoriokokeissa pelletöitiin eri lämpötiloissa käsiteltyä kahta raaka-ainetta. Raaka-aineita oli torrefioitu kolmella eri voimakkuudella. Larsson, Rudolfsson, Nordwaeger, Olofsson ja Samuelsson (2012, 4) ovat tehneet pelletöintikokeita 270 ja 300 asteen lämpötiloissa. Kirjallisuudesta saadun esimerkin mukaan raaka-aineiden saanto torrefioinnin jälkeen on riippuvainen käytetystä torrefiointiajasta ja lämpötilasta. Wihersaaren ja Agarin tekemien kokeiden perusteella männyn torrefiointi 280 asteessa lisäsi MJ/kg lämpöarvoa 18 % ollen täten 23,9 MJ/kg. Massapitoisuus oli 77 %, ja energiaa oli jäljellä 91 %. He myös kertovat, että havupuilla on pienempi massahäviö verrattuna lehtipuihin. Lehtipuilla on suurempi lämpöarvon kasvu kuin havupuilla johtuen lehtipuun erilaisesta hemiselluloosarakenteesta. (Wihersaaren & Agar 2010,14)

Larsson ym. (2012, 4) ovat tutkineet testein muun muassa top-pelletin irtotiheyttä, kosteusprosenttia, matriisin lämpötilaa, hienoaineksen määrää, kulutuskestävyyttä ja pelletin tuotosnopeutta. He myös ilmoittivat, että torrefioidun pelletin tekeminen kuluttaa 100% enemmän energiaa kuin normaalin pelletin tekeminen. Torrefioitua pellettiä tehtiin 35 mm matriisilla ja normaalia pellettiä 55 mm matriisilla.

Taulukko 4. Top-pelletin ominaisuudet Larsson ym. mukaan (2012, 4).

irtotiheys kg/i-m ³	kosteusprosentti %	matriisin lämpötila °C	hienoaineksen määrä %	kulutuskestävyys kg	pelletin tuotosnopeus kg/h
652–713	0,6–4,40	59,8– 105,4	10,0–32,3	80,0–90,3	147–332

6.1 Top-pelletin laatuominaisuudet

Normaaliin pellettiin verrattuna torrefioidulla pelletillä on potentiaalia tulla fossiilisten polttoaineiden korvaajaksi. Torrefioitu biomassa on tasalaatuista, joten loppukäyttäjä voi tuottaa energiaa huoltovapaammin. Taulukossa 5 on eri polttoaineiden ominaisuuksia ja taulukossa 6 on top-pelletin ominaisuuksia.

Taulukko 5. Eri polttoaineiden ominaisuuksia perustuu Alakankaan tuloksiin.

(Taulukko: Alakangas 2000, 152--157)

Polttoaine	Energiatiheys	Mittayksikkö	Irtotiheys	Tehollinen lämpöarvo	Tehollinen lämpöarvo	Tuhkapitoisuus
	MWh		kg/l-m ³	Kuiva MJ/kg	Kostea /MJ/ kg	%
Puupelletti	2,9–3,4	tonni	500–650	19–19,2	16	0,3-0,5
Top-pelletti	3,9–5,14	tonni	750–850	22,7	21,6	1
Hake karsittu	0,7-0,9	i-m ³	250–350	18,5–20	10,5	0,5-2
Kevyt polttoöljy	11,8	tonni	845	42,4–42,9	42,4- 42,9	0,01
Kivihiili	7	tonni	900–1000	27,9	24,8	14

Taulukko 6. Top-pelletin ominaisuudet perustuu Bergmanin esityksiin (Taulukko: Bergman 2005b, 2)

Raaka-aine	Paahdettu puu ja kasviperäinen biomassa
Käyttäjät	Kivihiiltä polttavat laitokset
Pelletin koko	Halkaisija noin 8 mm, keskipituus 10–30 mm
Energiasisältö	3,9–5,14 MWh/i-m ³
Kosteus	1–3 %
Tuhkapitoisuus	noin 1 %
Ominaispaino	750–850 kg/i-m ³
Tilantarve	1,25 m ³ /tonni
Lisäaineet	mahdollisesti tärkkelys

Alla on listattu positiiviset ja negatiiviset asiat top-pelletistä

+	Mahdollisuus korvata ympäristölle haitallista kivihiiltä 30–50 % (Flyktman ym. 2011, 4)
+	Tuotannosta, kuljetuksesta ja polttamisesta aiheutuu kivihiileen nähden huomattavasti vähemmän hiilidioksidipäästöjä. Kivihiilen aiheuttamat päästöt 396 kg CO ₂ /MWh ja top-pelletillä vastaava luku 134 kg CO ₂ /MWh (Happonen 2011, 50)
+	Kivihiilen poltosta joutuu maksamaan veroa
+	Ei vaadi kivihiililaitokselta uusia investointeja
+	Jauhautuu nopeasti ja kuluttaa energiaa normaaliin pellettiin ja kivihiileen verrattuna vähemmän
+	Suuri energiatiheys ja lämpöarvo (verrattuna muihin bioenergioihin). Samalla kuljetusmäärällä saadaan kuljetettua yli 30 % enemmän energiaa
+	Sisältää vähän tuhkaa ja tuhkan voi hyödyntää maanrakennukseen
+	Raaka-ainetta saatavissa melkein missä tahansa, etenkin Itä-Suomessa suuret metsävarat ja vähäinen kilpailu raaka-aineesta
+	Paikallinen tuotanto ja käyttö lisäävät työpaikkoja
+	Raaka-aine on uusiutuvaa ja lopputuote tasalaatuista
+	Raaka-aineeseen ei sitoudu pitkäksi aikaa pääoma kiinni
+	Vettä hylkivä ja kosteuspitoisuus alhainen 1–6 %
+	Sama energiamäärä tuotetaan normaaliin pellettiin verrattuna vähemmällä tuotantomäärällä. Arviolta harvennuspuulla 5 100 h/46 000 t/210000 MWh. Hakkuutähteellä 7 200 h/46 000 t/210 000 MWh
-	Top-pelletti on ilman tukia kalliimpaa kuin kivihiili.
-	Kuljetuskustannukset vesiteitse tai rautateitse eivät tarkkaan tiedossa. Laivakuljetuksilla pystyttäisiin kuljettamaan yli 5000 i-m ³ kerralla eli noin 40 rekka-autollista. Tämä vaatii suuret säilytystilat satamaan, jotta lastaus saadaan tehtyä tehokkaasti
-	Uusi teknologia voi aiheuttaa yllätyksiä tuotannossa ja valmiita laitteita ei ole vielä markkinoilla (Muuttuvien ja kiinteiden kustannuksien taso)
-	Olemassa olevilla normaalin pelletin laitteistoilla ei välttämättä saavuteta yhtä suurta tuotantokapasiteettia top-pellettiä valmistuksessa

-	On epävarmaa, onko pelletin tuotanto mahdollista pelkästään sähköntuotantotuella ja pysyykö biomassatuotanto verotuksen ulkopuolella
-	Hiilidioksidipäästöoikeuksien hintatasoa tulevaisuudessa on vaikea arvioida
-	Tuhkan hyödyntäminen
-	Vaikutukset kattilan tehoon ja korroosio-ongelmat
-	kilpailu raaka-aineesta ja maanomistajien halukkuus myydä raaka-ainetta

6.2 Top-pelletin tuotantokustannukset

Luvussa 5.2 perehdyttiin hakkeen tuotantokustannuksiin pellettitehtaan portille kuljetettuna. Edullisin tapa oli hyödyntää metsätähde ja hakettaa se käyttöpaikalla, jolloin hinnaksi muodostui 10,4 €/MWh. Hyvälaatuisen pelletin raaka-aine ei normaalisti sisällä kuorta, mutta torrefioidussa pelletissä myös hakkuutähteen käyttö lienee mahdollista. Hakkeen raaka-aineen hinta edellä mainituilla jakeilla on keskimäärin kuitu- ja energiapuulla 18–19,5 €/MWh, kantomurskeella 15,76 €/MWh ja hakkuutähteellä 10,4 €/MWh. Laitila ym. (2010, 81) mukaan pelletin tuottajat ovat maksaneet hakkeesta keskimäärin 16–18 €/MWh tehtaalle toimitettuna. Kokonaisuudessa pelletin tuotannossa kulurakenne on seuraava: kuivaus 6–7 €/MWh, raaka-aineen hinnasta 10,4–19,5 €/MWh sekä muut kulut 5–7 €/MWh. (Laitila ym. 2010, 83.) Lisäksi täytyy huomioida valmiin tuotteen toimituksesta aiheutuneet kulut. Aiemmin esitettyjen kustannuksien pohjalta 32 t:n top-pellettilastin toimitus autolla 75 km:n päähän maksaa noin 1,47 €/MWh. (Puolakanaho 2007, 54.) Junalla hakkeen kuljetuskustannukseksi on arvioitu tuovan kustannuksia 2,1 €/MWh eli top-pelletillä se olisi noin kolmanneksen eli 0,7 €/MWh ja laivalla 0,6–1,4 €/MWh. (Korpinen ym. 2011, 52–56). Saatsi, Ylinen, Huikuri, Okkonen, Prinz (2012, 72) mukaan Nurmeksen biojalostamolaitokselle lasketut arviot raaka-aineen kuljetuskustannuksiksi ovat seuraavat:

Maantiekuljetukset 5.1 €/t eli noin 1,8 €/MWh (70 km)

Rautatiekuljetukset 11.3 €/t noin 3,96 €/MWh (250km)

Aluskuljetusketju 10,7 €/t noin 3,75 €/MWh (200km)

Pelletin kokonaiskustannukseksi muodostuisi esitetyillä arvoilla autolla 75 kilometrin päähän kuljetettuna 22,87–34,97 €/MWh, auto + laiva 23,47–33,37 €/MWh ja junalla 22,–34,1 €/MWh. Laitila ym. (2010, 89) mukaan torrefioidun pelletin tuotantokustannuksien on arvioitu lisäävän lopullisia kustannuksia vielä 4–6 €/MWh. Torrefioidun pelletin kustannukset olisivat siis luokkaa 26 – 41 €/MWh riippuen, millä tavalla kuljetus loppukäyttäjälle järjestetään ja mikä on käytettävä raaka-aine. Lisäksi kustannuksia voi syntyä kuormauksesta ja purkamisesta. Vuonna 2011 pelletin kuluttajahinta oli 5 tonnin toimituserällä 260 €/t eli 55 €/MWh ja keskimääräinen vientihinta 127 €/t eli noin 27 €/MWh. (Ylitalo 2012, 1.) Bergmanin (2005b, 22) mukaan top-pelletin hinta voisi olla noin 150 €/t (33 €/MWh) ja kotimarkkinoilla 185 €/t (41 €/MWh). Flyktmanin ym. (2011, 6, 10) mukaan hinta voisi olla 35 €/MWh sisältäen 500 km rautatie-/vesikuljetuksen, jonka hinta on 5 €/MWh.

6.3 Tuotantokustannusten tulkintaa

Thekin ja Obernbergerin (2001) (Laitila ym. 2010, 80 mukaan) tutkimuksessa on selvitetty pelletin tuotantokustannuksia 9 eri laitoksesta, joiden tuotanto vaihteli 430–79 000 tonnia pellettiä vuodessa. Käytän heidän saamiaan arvoja eri tuotantokustannuksista, joihin sovellan Larssonin ym. (2012, 4) kokeista saatuja havaintoja sekä muualta kirjallisuudesta saatua tietoa. Pelletin tuotantokustannuksista suurimman erän muodostaa raaka-aine- ja kuivauskustannukset, jotka ovat yhteensä 63 %.(Laitila ym. 2010, 80).

Top-pelletin energiaomavaraisuus riippuu pitkälti siitä, kuinka prosessista saatuja kaasuja voidaan hyödyntää seuraavan erän kuivaamiseen, eli onko kaasuilla mahdollista esikuivata raaka-ainetta, vai joudutaanko lisälämpöä tuottamaan muilla kaasuilla, jolloin kustannuksia syntyy hieman lisää. Top-pelletin tuotannossa kuivaus vaatii normaaliin pellettiin verrattuna vähemmän energiaa, koska prosessi on osittain omavarainen. Lisäksi hyötyä saadaan siitä, että top-pellettiä tarvitsee valmistaa huomattavasti vähemmän kuin normaalia pellettiä saman energiamäärän saamiseksi. (Bergman 2005b, 19.)

Alla taulukossa 7 esitetään kirjallisuudesta poimittuja arvoja top-pelletin hinnan muodostumiseen. Taulukossa 8 osaa arvoista on muunneltu, muutokset perustuvat kirjallisuudessa esitettyihin tuloksiin.

Taulukko 7. Top-pelletin hinnan muodostuminen, perustuu aineistoon Thek ja Obernberger 2001, Laitilan ym. 2010 79–80 mukaan.

nro.	(€/MWh)Minimi	(€/MWh)Keskiarvo	(€/MWh)Maksimi
1 Raaka-aine*	10,4	14,95	19,5
2 Kuivaus	6	6,5	7
3 Torrefiointi	4	5	6
4 Hienonnus / jauhatus	0,85	0,925	1
5 Pelletöinti	2	2,35	2,7
6 Jäähdytys	0,15	0,225	0,3
7 Varastointi	0,3	0,65	1
8 Tuotantoympäristö	0,1	0,6	1,1
9 Henkilöstökulut	2	2,5	3
10 Investointikustannukset	0,1	0,5	0,9
11 Kuljetus loppukäyttäjälle juna	5	5	5
Auto 1,47€/MWh+ laiva (0,6 €/Mwh)	2,07	2,47	2,87
13 Muut purku, lastaus			
14 Kustannukset yhteensä juna	30,9	39,2	47,5
15 Kustannukset yhteensä laiva+ auto	27,97	36,67	45,37

* (Ihalainen & Niskanen 2010, 24.)

Taulukko 8. Top-pelletin kustannukset, muunnellut arvot.

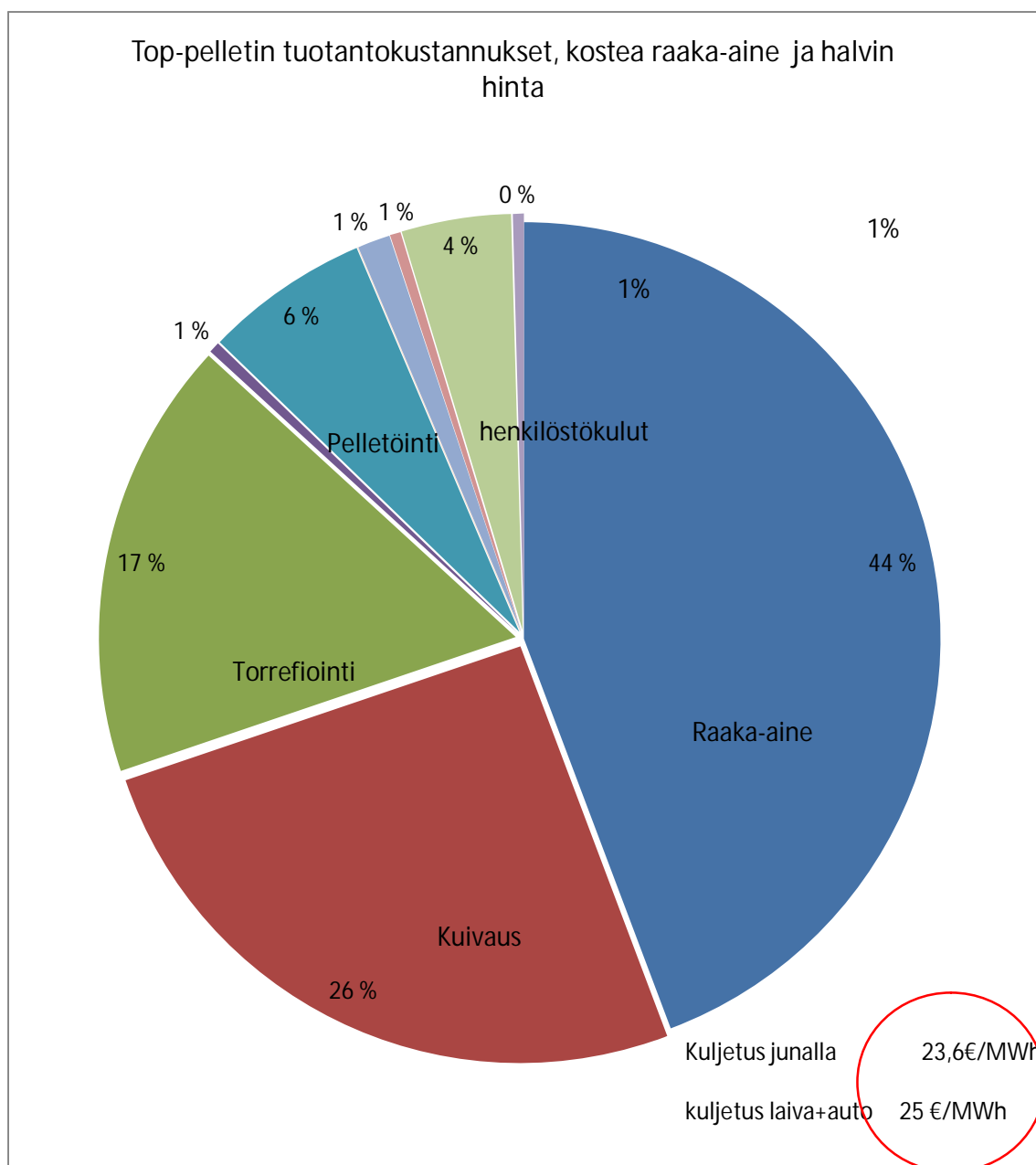
nro.	(€/ MWh)A	(€/ MWh)B	(€/ MWh)C
1 Raaka-aine*	10,4	10,4	10,4
2 Kuivaus	5,7	5,4	5,1
3 Torrefiointi	3,8	3,6	3,4
4 Hienonnus / jauhatus	0,425	0,34	0,255
5 Pelletöinti	1,128	1,128	1,128
6 Jäähdytys	0,15	0,15	0,15
7 Varastointi	0,3	0,3	0,3
8 Tuotantoympäristö	0,1	0,1	0,1
9 Henkilöstökulut	2	2	2
10 Investointikustannukset	0,1	0,1	0,1
11 Kuljetus loppukäyttäjälle juna	0,7	0,7	0,7
Auto+ laiva ,47€/MWh + laiva (0,6 €/Mwh)	2,07	2,07	2,07
13 Muut purku, lastaus			
14 Kustannukset yhteensä juna	24,803	24,218	23,633
15 Kustannukset yhteensä laiva+ auto	26,173	25,588	25,003

Taulukon 8 esimerkissä raaka-aineena käytetään hakkuutähdettä, joka on halvin raaka-aine (10,4 €/MWh). Kuivauksen ja torrefioinnin kustannusta on alennettu kohdassa (€/MWh)A 5 %, jauhatuksen kustannusta 50 %.

Kohdassa (€/MWh)B kuivauksen ja torrefioinnin kustannusta on alennettu 10 %, jauhatuksen kustannusta 60 %.

Kohdassa (€/MWh)C kuivauksen ja torrefioinnin kustannusta on alennettu 15 %, jauhatuksen kustannusta 70 %.

”Kustannukset yhteensä juna” perustuu junalla kuljetetun hakkeen kuljetuskokeeseen. Hakkeen kuljetus junalla 342 km matkalla oli kustannuksiltaan 2,1 €/MWh. Top-pelletillä kuljetuskustannus on hakkeen kustannuksista kolmannes eli junalla noin 0,7 €/MWh ja laivalla 0,6–1,4 €/MWh. (Korpinen ym. 2011, 52–56.)

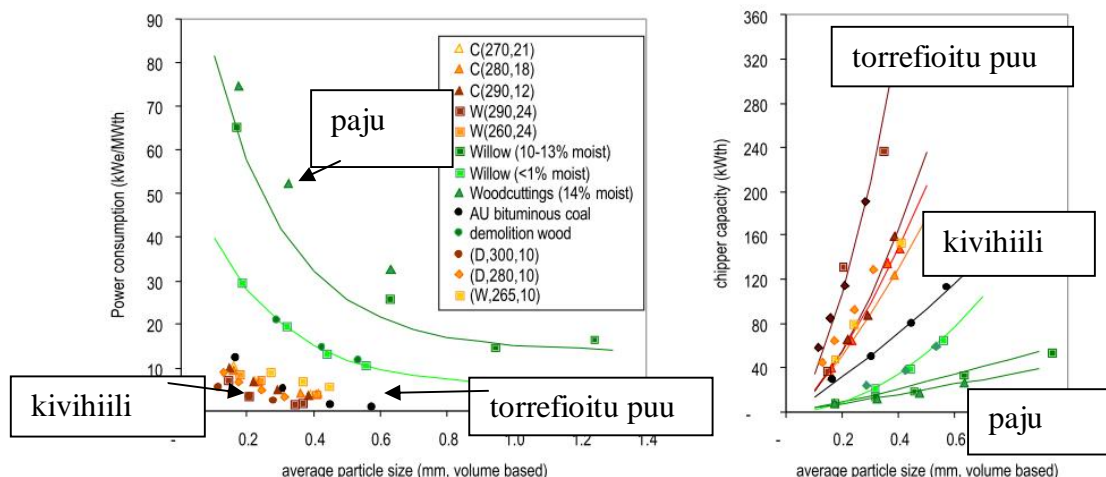


Kuva 18. Top-pelletin tuotantokustannukset muunnelluilla arvoilla. (Kuva: Simo Kuittinen.)

Kuvassa 18 on muunnellut arvot, joihin on laskettu prosentuaalisia alenemia edellä esitetyille arvoille. Kuvassa näkyy minimihinta, jolla top-pellettiä voitaisiin tuottaa sekä kuljettaa loppukäyttäjälle. Varastointi, jäädytys, hienonnus, tuotantoympäristö sekä investointikustannuksien osuus on noin 3 %. Laskelmissa ei ole huomioitu lastauksesta eikä purkamisesta aiheutuneita kuluja.

Oulun yliopiston Thule-instituutin laskelmissa saatiin normaalin pelletin hinnaksi tuotantopaikalla 26,1 €/MWh (Laitila ym. 2010, 80). Laitilan ym. (2010, 89) mukaan Suomessa top-pelletin hinta on 100 km päähän kuljetettuna keskimäärin 33–40 €/MWh. Taulukko 7 olevat laskelmat osoittavat, että halvin hinta (26,6–27,97 €/MWh) muodostuisi junakuljetuksilla ja laiva- + autokuljetuksella loppukäyttäjän portille ilman prosentuaalisia alenemia. Prosentuaaliset alenemiset on tehty pelkästään minimihintaan taulukossa 8. Muutos muissa hintaluokissa olisi samanlainen eli noin 2,5 €/MWh. Muunnelluissa arvoissa on huomioitu muiden tutkimuksien havaintoja, joita suhteutetaan taulukon 8 arvoihin. Raaka-aineen hinta 10,4 €/MWh (Ihalainen & Niskanen 2010, 24) on kirjallisuudesta poimittu hinta tuoreelle hakkuutähteelle, joka haketetaan käyttöpaikalla. Kuivaus ja torrefiointi ovat ensimmäisiä arvoja, joita muutettiin. Muutos perustuu kirjallisuudesta saatuihin tietoihin, että kuivaus ja torrefiointi olisivat lähes omavaraisia. (Shorr ym. 2012, 3.) Muutokset on tehty 5, 10 ja 15 %: n omavaraisuusasteella alkuperäisestä arvosta, eli ei läheskään omavaraisuusasteella. Laitteet kuluttava aina jonkin verran sähköä, koska kyseessä ei ole ikiliikkuja. Hienonnusta/jauhatusta on muutettu niin ikään kirjallisuudesta saadun tiedon pohjalta (Obernberger & Thek 2010, 106–108.) Jauhattavuutta alennettiin 50, 60 ja 70 %. Vaikka jauhattavuus ei esitä suurta osaa kustannuksista, alentaa se pitkällä aikavälillä kustannuksia. Obernbergerin ja Thekin (2010, 105) mukaan raaka-aineesta riippuen top-pelletin energiankulutus voi olla jopa 85 % pienempi kuin normaalin pelletin. Jauhamista tehdään kaksi kertaa: ensimmäisen kerran, kun valmistetaan pellettiä ja toisen kerran, kun pelletti jauhetaan esim. kivihiilen sekaan polttoon. Heidän mukaansa torrefiointi nopeuttaa myös jauhamiseen kuluvaan aikaa.

Kuvassa 19 on esitetty kivihiilen ja torrefioitun biomassan sekä tuoreen pajun jauhamiseen kuluvaan energiaa sekä haketinkapasiteettia. (ks. Bergman 2005b, 17.)



Kuva 19. Jauhautumiseen kuluva energia vasemmalla ja oikealla jauhautumisnopeus. (Kuva: Bergman 2005b, 17).

Taulukossa 8 kohdassa 5 on esitetty pelletöinnistä aiheutuva hinta 1,128 €/MWh. Larssonin ym. (2012, 4) mukaan energian kulutus kasvoi 100 % normaalin pelletin tekoon verrattuna. Kokemukseni mukaan pelletöinnistä ja kirjallisuudesta saadun tiedon perusteella torrefioinnin pitäisi alentaa pelletöintiin kuluva energia määrä. Tässä kohdassa on syytä huomioda, että Larssonin ym. (2012, 4) tutkimuksien ja Obernbergerin ja Thekin (2010, 108) tutkimuksien raaka-aineita ei tarkkaan tiedetä. On siis mahdollista, että raaka-aine vaikuttaa sähkönkulutukseen ja vastaavasti tuotokseen (kg/h). Taulukon 8 pelletöinnin hinta perustuu siihen, että tietyllä raaka-aineella sähkönkulutus laskee ja tätä kautta myös pelletöinnin hinta.

Laitoksen vuosituotos vaikuttaa siihen, mikä merkitys tuotoksella lopullisessa hinnassa on. Lopulliseen hintaan vaikuttaa esimerkiksi, tuotetaanko pellettiä yhdessä, kahdessa vai kolmessa työvuorossa, vai saadaanko päiväkohtainen tuotos kasaan, vaikka käytettäisiin mitä tahansa raaka-ainetta. Oletetaan, että pellettitehtaan tuotantokapasiteetti on 70 000 tonnia/a. Huippukäyttöajalla 8 000 tuntia/kolmivuorotyö on tuntituotoksen oltava noin 9 tonnia/tunti (h). Normaalina pellettiä tuotettaessa saadaan energiasisällöksi 70 000 tonnia x 3 MWh eli 210 000 MWh. Top-pellettiä tarvitsisi saman energiamäärän tuottamiseksi valmistaa 46 000 tonnia (top-pelletin energiasisältö ~4,52 MWh). Jos tilannetta tarkastelee, tuotetuilla MWh/vuosi, riittää käyttöasteeksi lyhyempikin aika, kun tuotteen valmistukseen kuluva aika pysyy vakiona. 46 000 tonnia/a (top-pellettiä) olisi mahdollista valmistaa teoriassa (46 000 tonnia:9 tonnia/h) 5

100 tunnissa. Larsson ym. (2012, 4) ovat tehneet samalla pelletinpuristimella normaaleja pellettejä. Näissä tuotos on ollut noin 200 kg/h, kun matriisin pituus on ollut 55 mm ja halkaisija 8 mm. Larssonin ym. (2012, 1, 4) testeissä top-pellettiä valmistettiin kuusesta keskimäärin 220 kg/h, mutta matriisin pituus oli 35 mm ja halkaisija 8 mm. Keskimääräisen tuotoksen 220 kg/h pohjalta oletan, että 210 000 MWh energiamäärän valmistamiseen kuluisi aikaa noin 5 100 h, koska tuntituotos on ollut lähes samanlainen kuin normaalin pelletin tuotos (200 kg/h). Heikoimmillaan tuotos oli Larssonin ym. (2012, 4) tutkimuksissa 147 kg/h. Heikoimmalla tuotoksella valmistettua top-pellettiä täytyisi 210 000 MWh energiamäärää valmistaa arviolta 7 200 h.

Keskimääräiseen tuotokseen perustuen top-pelletin tuotos olisi 5 100 h/210 000 MWh. Normaalialia pelletteä täytyisi valmistaa n. 8 000 h/210 000 MWh ja huonoimmalla tuotantomäärällä (147 kg/h) valmistettua top-pellettiä n. 7 200 h/210 000 MWh. Oletetaan, että raaka-aine vaikuttaa tuotantomäärään. Esim. jos pienin tuotos syntyisi hakkuutähteellä, maksaisi top-pelletin valmistus (210 000 MWh x n. 24–25 €/MWh (taulukko 8, sarake 5)) noin 5,25 milj. euroa ja valmistukseen menisi aikaa n. 7 200 h. Vastaavasti harvennuspuusta taulukon 8 keskiarvon mukaan valmistettu top-pelletti maksaisi noin (210 000 MWh x 36 €/MWh) 7,5 milj.euroa ja valmistusaika olisi n. 5 100 h.

Nopeammassa tuotantoprosessissa, johon kuluu aikaa 5 100 h, säästyy teoriassa koneet, sähköä, lämpöä ja työntekijäkustannuksia. Pelkästään työntekijäkustannuksia säästyy 16,1 €/h. 10 työntekijällä säästöä syntyisi siis 16,1 €/h x 10 x (9 000 h - 5 100 h) noin 800 000 euroa/v (henkilökustannus 16,1 €/h on otettu teoksesta Ihalainen ja Sikanen 2010, 15). Harvennuspuusta valmistetun top-pelletin lopullinen hinta loppukäyttäjällä olisi taulukon 7 mukaan noin 36–39 €/MWh (keskiarvo taulukokko 7), joten nopeammalla tuotannolla ei välttämättä saavuteta niin suurta hyötyä kuin käytettäessä top-pelletin valmistukseen hakkuutähdettä, jonka kustannus loppukäyttäjällä on taulukko 8 mukaan noin 23,6–25 €/MWh.

Taulukossa 8 varastoinnin etuja tulee siinä, että raaka-ainetta voidaan säilöä vähemmän suojaississa paikoissa ja lastaukset voidaan tehdä sääoloista riippumatta. Valmiin top-pelletin kuljetuksista aiheutuvat kulut on hankala arvioida, koska käytännön kokemusta juna- ja laivaliikennelogistiikasta ei ole. Larssonin ym. (2012, 4) tutkimuksesta ilmenee,

että huonoimman tuotoksen (147 kg/h) irtotiheys oli 691 kg/m³ ja parhaimman tuotoksen (332 kg/h) irtotiheys oli 630 kg/m³. Heikompi tuotos (147 kg/h) antoi noin 9,6 % suuremman irtotiheyden kuin parempi tuotos (332 kg/h). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että samalla kuljetusmäärällä saadaan kuljetettua noin 10 % enemmän energiaa.

7 Tulosten analysointi

Oikein valittu raaka-aine säilyttää paahtamisen jälkeen sopivimmat alkuaineet, joiden ansiota tulevan pelletin oletettiin antavan enemmän energiaa ja kestävän kasassa paremmin sekä jauhautuvan ja palavan kivihiilen seassa hyvin. Myös paahtamisasteella - ja ajalla on vaikutusta edellä mainittuihin asioihin. Kuten aiemmin tuli esille, energia kasvaa suhteessa jäljellä olevaan massan, mitä suurempi torrefiointi lämpötila on ollut, niin sitä suurempi on jäljelle jäänyt energia suhteessa jäljellä olevaan massaan.

Pelletöinti lisäsi raaka-aineen irtotiheyden kuudesta tehdystä raaka-aineesta noin kolminkertaiseksi (Larsson ym. 2012, 4). Suurella tiheydellä on suuri painoarvo, kun valmista tuotetta joudutaan kuljettamaan lopulliseen käyttöpaikkaan. Kiintotiheydellä on merkitystä käyttöpaikassa, jossa se murskataan ja varastoidaan ennen käyttöä. Suuren kiintotiheyden omaava raaka-aine mahdollistaa suuren energiamäärän säilömisen pieneen tilaan. Torrefioinnissa raaka-aineen tehollinen lämpöarvo kasvaa. Kuivan torrefioidun puupelletin lämpöarvo on 22,7 MJ/kg. Larssonin ym. (2012, 4) kokeissa saadut kosteuspitoisuudet olivat 0,6–4,4 %. Top-pelletin kosteuden ollessa 1 % on sen lämpöarvo noin 21,6 MJ/kg (Flyktman ym. 2011, 32).

Larssonin ym. (2012, 4) mukaan kuudesta tehdyllä top-pelletillä tuotos oli parhaimmillaan 332 kg/h ja irtoainesta syntyi noin 10,5 %. Irtotiheys oli 630 kg/im³. Raaka-aine oli ennen torrefiointia jauhettu 10,6 %:n kosteudessa ja torrefioitu 300 asteessa. Heikoin tuotantokapasiteetti 147 kg/h syntyi, kun 10,4 % kosteudessa olevaa raaka-ainetta torrefioitiin 300 asteessa. Tällöin irtotiheys oli 691 kg/i-m³ ja hienoainesta syntyi 16,7 %. Heikoimman ja parhaimman tuloksen ero tuotannossa selittyy matriisiin

lämpötilalla. Heikoimmassa tuotantomäärässä (147 kg/h) matriisin lämpötila oli 59,8 celsius astetta, kun taas (332 kg/h), tuotoksessa matriisin lämpötila oli 96,4 astetta.

Larssonin ym. (2012, 4) kokeessa ilmenee, että sähkönkulutus on ollut 100 % suurempaa tehdessä top-pellettiä, kun sähkönkulutusta verrataan normaaliin pelletin tekoon. Larsson ym. (2012, 4) kokeista ei ilmennyt millaisilla kuusen raaka-aineilla tulokset saatiin. Ei siis tiedetä käytettiinkö kokeissa esim. harvennuspuuta, energiapuuta tai jopa hakkuutähdettä. Matriisin lämpötilalla oli ilmeinen vaikutus tuotantokapasiteettiin (kg/h). Tärkeää on myös huomata, että irtotiheys oli Larssonin ym. kokeiden perusteella suurempi pienemmällä tuotantokapasiteetilla. Suurimman ja pienimmän tuotannon ero oli 2,25-kertainen. Vastaavasti irtotiheys oli pienemmän tuotantokapasiteetin eduksi noin 9,6 %. Hienoaineksen ero oli 6,2 % suuremman tuotantokapasiteetin eduksi.

7.1 Jatkotutkimukset ja kehitysideat

Larssonin ym. (2012, 4) tekemille top-pelleteille ei ollut tehty jauhatus- tai polttokokeita. Poltto- ja jauhatuskokeiden avulla on mahdollisuus arvioida, millaista raaka-ainetta kannattaa torrefioida ja millainen torrefiointilämpötila antaa loppukäyttäjän kannalta parasta pellettiä hinta-laatusuhteeltaan. Vielä ei esimerkiksi tiedetä, vaikuttaako kulutuskestävyys jauhautumiseen. Pelletin tuottajan kannalta on tärkeää tietää, kuinka paljon energiaa voidaan kerralla kuljettaa loppukäyttäjälle. Larssonin ym. (2012, 4) kokeissa top-pellettien irtotiheydet olivat suhteellisen matalat 630–713 kg/i-m³, kun taas Bergman ym. (2005c, 5) ilmoittavat top-pelletin irtotiheydeksi 750–850 kg/i-m³. Tuottajaa kiinnostaa, paljonko energiaa kuluu pelletin valmistamiseen sekä mistä raaka-aineesta pellettiä kannattaa valmistaa. Tärkeää on myös pohtia, millaista raaka-ainetta on tuotantolaitoksen läheisyydessä saatavilla.

Alla on lista, johon on kerätty torrefioinnin kannalta haastavat ja pohdittavat tilanteet. Lista perustuu Bergmanin ym. (2005a, 33) saamiin tuloksiin.

- Biomassan kosteusprosentti ja raaka-aine
- Torrefiointiaika ja –lämpötila Kaasujen hyödyntäminen (prosessin energiatehokkuus)
- Massan ja energiatasapainon löytäminen
- Pelletin jauhautuminen ja palaminen kivihiilivoimalaitoksissa

Laboratoriokokeiden tulokset olivat kirjallisuudessa esitettyjen arvojen mukaisia. Kokeiden perusteella esitettyjä havaintoja ei voi yleistää, koska kyseessä oli yksittäinen koe. Varsinkin tuotoslaskelmissa (kg/h) on syytä olla kriittinen, koska todellista ison mittakaavan tuotantoa top-pelleteillä ei ole tehty. Myös kuivauksen ja pelletöinnin energiaomavaraisuus on arvio. Mekrijärven tutkimuslaitos on saamassa oman torrefiointilaitteiston. Laitteiston tultua on lisäkokeilla suuri painoarvo ja tutkimusta top-pelletin osalta voi viedä eteenpäin. Selvitettävää riittää myös siinä, esiintyykö torrefioinnissa tervan aiheuttamia putkistojen tukkeutumisia. Pihkan pois saanti puusta voisi vähentää tervan aiheuttamia putkistojen tukkeutumisia, jos torrefiointiprosessissa tapahtuu kaasujen lauhtumista. Esimerkiksi torrefioinnissa kaasujen mukana kulkeutuu myös tervaa sisältäviä partikkeleja, jotka voivat aiheuttaa tukkoja, jos lämpötila laskee liikaa (Kleinschmit 2011, 7.)

8 Johtopäätökset ja yhteenveto

Bergmanin (2005b, 22) mukaan top-pelletin hinta voisi olla noin 150 €/t (33 €/MWh) ja kotimarkkinoilla 185 €/t (41 €/MWh). Flyktmanin ym. (2011, 6, 10) mukaan hinta voisi olla 35 €/MWh sisältäen 500 km rautatie-/vesikuljetuksen, jonka hinta on 5 €/MWh. Lopullisen hinnan määrää se, kuinka varmasti polttoainetta on saatavilla, kuinka kaukaa sitä tuodaan ja kuinka biopolttoaineiden polttamista tuetaan sekä miten paljon kivihiilen

poltosta joudutaan maksamaan veroa. Saadaanko pelletin tuotannosta kannattavaa liiketoimintaa, riippuu pitkälti raaka-aineen hinnasta ja tietenkin lopullisesta pelletin hinnasta. Raaka-aineiden hinnat noussevat muiden hintojen tavoin, mutta Pohjois-Karjalassa kilpailu raaka-aineen saatavuudesta ei ole kovin suurta, joten hinnat pysyvät maltillisina. Raaka-aineen hintaan vaikuttaa myös se millaiseksi tulevaisuuden Petu tai vastaava tuki muodostuu.

Kotimaisella energialla halutaan korvata tuontienergiaa. Suomen energiahuollon omavaraisuusaste on alhainen ja tuontienegian osuus on Tilastokeskuksen (2012) mukaan ollut jo vuosia noin 70 %. Puhtaan energiaohjelman myötä Suomen tavoitteena on leikata öljystä viidennes, maakaasusta kymmenesosa ja hiilestä olisi tarkoitus luopua lähes kokonaan. Hallituksen esittämät linjaukset tähtäävät siihen, että mm. metsäsektori kehittyisi, työpaikkoja tulisi lisää ja vaihtotase paranisi. Uusiutuvien energioiden käyttöönotto alentaa myös hiilidioksidipäästöjä. (Työ- ja Elinkeinoministeriö 2012)

Säästöjä voi tulla raaka-aineenhankinnassa, jos korjuu tehdään metsänhoidollisena toimenpiteenä ja raaka-aine saadaan ilmaiseksi työtä vastaan. Uusi teknologia korjuussa, kuten sähkömoottorilla varustetut ajo- ja tekokoneet, on hyvä esimerkki säästöä tuovista toimista. Top-pellettiä on mahdollista tehdä myös kuorellisesta puusta, joten säästöjä syntyy myös kuorinnan pois jäännistä. Hakkeen jalostaminen puristeeksi, kuten top-pelletiksi, tuo säästöjä kuljetuskustannuksissa, koska top-pellettiä kuljetettaessa ei kuljeteta niin paljon vettä ja samalla ajokerralla saadaan kuljetettua suurempi lämpö määrä.

Yhdistelmäajoneuvo voi kuljettaa esimerkiksi 37 tonnia + oman painon 23 tonnia (Puolakanaho 2007, 54). Top-pelletin irtotiheys on keskimäärin Schorrin ym. (2012, 30–31) mukaan 800 kg/i-m^3 , joten kuljetuskapasiteetti on $46 \text{ i-m}^3/37 \text{ t}$. Yhdistelmäajoneuvon kapasiteetti on 120 m^3 , joten autoa kannattaisi muokata pelletin kuljettamiseen sopivammaksi. Auton ominaisuuksia muuttamalla voi ilmanvastusta saada pienemmäksi ja rengaspainetta säätelevällä laitteistolla on mahdollista saada säästöjä polttoaineen kulutuksessa. Pitkän matkan kuljettaminen ei ole pelletinkään kohdalla järkevää, mutta raaka-aineen kuljetuksiin säästöjä on mahdollista saada. Maanteitse tapahtuvia lähikuljetuksia ajatellen maksimikuorman kasvattamisella on omat vaikutuksensa. Ruotsissa on kokeiltu yli 90 t maantiekuljetuksia puutavara-

autoilla ja kaivosteollisuus on suunnitellut kuljetuksia jopa 130 t:n yhdistelmäajoneuvoilla. (Elinkeinoelämän keskusliitto 2011.)

Suomessa työvoimakustannuksilla ei voida kilpailla. Kilpailuetua on haettava muilta sektoreilta, kuten innovatiivisuudesta, toimintavarmuudesta ja metsävaroista, jotka ovat pelletintuotannon peruselementtejä. Hiilestä luopuminen on pellettisektorille mieluisaa, mutta välillä tuntuu, etteivät energiapolitiikan ohjauskeinot ole riittäviä tai uudistuksia ei tehdä ennen kuin on pakko. Tilastokeskuksen (2012) raportin mukaan Suomen kivihiilivarastot olivat yhteensä 31 TWh. Kivihiilivarastot olivat siis yli 80 % suuremmat kuin vuotta aiemmin. Vuonna 2020 hakkeen korjuupotentiaaliksi on arvioitu noin 16 miljoonaa kiintokuutiometriä, mikä vastaa energiana noin 31,8 TWh:a. (Laitila ym. 2010, 30.) Kivihiilen kohdalla suuret varastot eivät näytä tuottavan ongelmia. Kivihiili ei kostu herkästi, mutta vastaavan varmuusvaraston ylläpitäminen hakkeena ei liene mahdollista hakkeen kostumisen ja tilan puutteen takia.

Suomen vuotuinen pelletintuotanto on noin 300 000 tonnia ja se antaa energiaa noin 1,4 TWh. Kivihiilivoimalaitokset käyttävät noin 14 TWh kivihiiltä energian tuotantoon. Parhaassa tapauksessa top-pelletillä voitaisiin korvata puolet kivihiilestä eli noin 7 TWh. Tämä arvio perustuu aiemmin esitettyihin oletuksiin, että kivihiilipölykattiloissa top-pelletin osuus voisi olla jopa 50 %. (Flyktman ym. 2011, 4). Jos 7 TWh korvattaisiin kokonaan torrefioidulla pelletillä, täytyisi vuotuinen top-pelletin tuotanto olla noin miljoona tonnia top-pellettiä. Kapasiteetiltaan 70 000 t/a tuottavia laitoksia pitäisi olla Suomessa noin 20 kappaletta. Kaikkea 7 TWh ei tietenkään tulisi korvaamaan pelletillä, mutta kuitenkin useita laitoksia tarvitaan, jotta kivihiili pystytään korvaamaan uusiutuvalla energialla. Hallituksen esittämä 2 TWh pelletin käyttö on mahdollista saavuttaa etenkin, jos top-pelletti saa jalansijaa kivihiilivoimalaitoksissa. (TEM 2010). Itä-Suomen yliopisto ja Pellettienergiayhdistys uskovat, että vuoteen 2020 mennessä pellettiä käytettäisiin jopa 7 TWh. (UEF ja Pellettienergiayhdistys 2010)

Tavalliseen pellettiin verrattuna torrefioidun puun jauhaminen vaatii 50–85 % vähemmän energiaa. Top-pelletin energiasisältö nousee noin 3,2 MWh:sta noin 5,1 MWh:iin. Tämä tarkoittaa sitä, että samalla kuljetusmäärällä saadaan kuljetettua yli 30 % enemmän irtokuutioita (pelletti 650 kg/i-m³, top-pelletti 850 kg/i-m³) ja tästä johtuen voidaan kuljettaa myös enemmän energiaa. Suurempi energiatiheys alentaa myös

varastointiin tarvittavan alueen määrää ja kivihiilen kanssa tapahtuva seospoltto mahdollistaa raaka-aineiden varastoinnin jopa samoissa tiloissa. (Obernberger & Thek, 2010, 105.) Helsingin energian tavoitteena on, että vuonna 2020 energiantuotannosta korvataan 20 % uusiutuvalla energialla. Helsinki pitää tärkeänä kestävyyskriteereitä, hintaa, saatavuutta ja toimintavarmuutta. Hanasaaren ja Salmisaaren voimalat ovat varautuneet siirtymään 40 % biopolttoaineen osuuteen vuoteen 2020 mennessä. Puupellettinä 40 % vastaa 750 000 tonnia eli noin 55 pellettirekkaa joka vuorokausi. (Makkonen 2012, 4.) Top-pelletillä tuotetun energiamäärän saisi kasaan 38 rekalla/vuorokausi.

Yhteenveto

Tämä opinnäytetyö kuuluu osana Hajautetut biojalostamot -hanketta, jota toteuttavat Itä-Suomen yliopisto sekä Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Työssä tutkittiin raaka-aineen saatavuutta Ilomantsin pellettitehtaalte sekä pohdittiin, millaisesta raaka-aineesta pellettiä voidaan valmistaa kustannustehokkaimmin. Lisäksi tutkittiin pelletin laadullisia ominaisuuksia ja logistisia kuljetusmahdollisuuksia loppukäyttäjälle. Hakkuutähteestä valmistettu top-pelletti oli kustannuksiltaan noin 24–26 €/MWh. Top-pelletin myyntihinnan arvellaan asettuvan noin 33–38 €/MWh: iin 100 km päähän toimitettuna (Virkkunen ym. 2012, 10). Pohjois-Karjalassa hakkuutähteitä yksityismetsissä oli kerättävänä noin 28 % avohakkuualoista. Avohakkuualoilla on kuusen osuus oltava yli 50 %, jotta sen kerääminen on kannattavaa. Pohjois-Karjalassa valtapuu on mänty, mutta kuusen osuus on kasvamassa koko ajan suuremmaksi. Lisäksi energiapuun määrä on runsasta Pohjois-Karjalassa. Raaka-ainetta riittää, mutta sen saaminen liikkeelle vaatii entistä suuremman työn tulevaisuudessa. Puuta käyttäviä laitoksia syntyyneen maakuntaan lähitulevaisuudessa lisää, joten tuotantolaitoksen pyöriminen pelkästään halvimalla raaka-aineella ei liene mahdollista. Tuotantokustannuksia laskettaessa onkin syytä pohtia, kuinka paljon erilaisia jakeita lähialueelta on saatavissa ja mihin hintaa? Puun toimittajat on valittava hyvissä ajoin ja myös lopputuotteelle on oltava markkinoita. Kaupunkimetsänomistajien määrän kasvu ja metsäalan kiinnostavuuden lasku voivat olla uhkana raaka-aineen saannille.

Suomessa ja monessa EU-maassa voimme kehittää ja kehittyä maakunta kerrallaan jakamalla tietotaitoa keskenämme. Kansainväliset kumppanuudet yliopistojen ja muiden tahojen välillä on hyvä asia. Pohjois-Karjalassa voimme olla ylpeitä vihreästä liiketoiminnasta, ja on todella mukavaa nauttia puhtaasta luonnosta. Uusiutuvana energiana puupellettilämmitys ei tuota oikein käytettynä lainkaan haitallisia hiilidioksidipäästöjä, koska poltetun puun vapautuva hiilidioksidi sitoutuu uudelleen puuston kasvuun. Puu luokitellaan hiilineutraaliksi polttoaineeksi, joka tarjoaa työtä kotimaisille toimijoille kestävän kehityksen mukaisesti. Itä-Suomessa bioenergian tekemiseen kannattaa siis hyödyntää olemassa olevia metsävaroja. Peltoalaa ei kannata uhrata energiantuottamiseen, vaan hyödyntää ruuan kasvattamiseen niin eläimille kuin ihmisellekin. Top-pelletin tuotanto vähentää hiilijalanjälkeä entisestään. Kuljetettiinpa top-pellettiä millä kulkuneuvolla tahansa, vähentää se energiasisältönä laskettuna kuljetuksien määrää muihin bioenergioihin nähden. Suomessa työvoimakustannuksilla ei voida kilpailla. Kilpailuetua on haettava muilta sektoreilta, kuten innovatiivisuudesta, toimintavarmuudesta ja metsävaroista, jotka ovat pelletintuotannon peruselementtejä. Top-pelletti on mitä mainioin tuote, kun sitä joudutaan käsittelemään talvella lumen aikaan, sateilla tai muuten kosteissa olosuhteissa.

Työ oli erittäin mielenkiintoinen tehdä. Uskon top-pelletin mahdollisuuksiin energiantuotannossa tulevaisuudessa. Odotan myös pääseväni työskentelemään jatkossa bioenergian parissa entistä tiiviimmin.

LÄHTEET

- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Energia ISBN 951-38-5699-2 Espoo Otsamedia Oy 2000. 196 s.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. 7.10.2012
- Alakangas, E. 2007. Puupolttoaineiden pientuotannon ja – käytön panostusalue vuosikatsaus 2007. VTT Prosessit .ISBN 952-457-216-8.
www.tekes.fi/fi/document/42982/pienpuu_vuosikatsaus_2007_pdf
 8.10.2012
- Anttila , P & Laitila, J. 2008. Metla raportti. Email. juha.laitila@metla.fi.30.9.2012
- Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R & Kiel, J.H.A 2005a Torrefecation for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. “ BIOCOAL”.
 ECN report, ECN-C--05-013.
<ftp://kernenergie.nl/pub/www/library/report/2005/c05013.pdf>. 1.10.2012
- Bergman P.C.A 2005b Combined torrefaction and pelletisation: The TOP process. ECN report, ECN- C--05-073.
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf>. 1.10.2012
- Bergman, P.C.A & Kiel, J.H.A. 2005c Torrefaction for biomass upgrading. ECN-RX--05-180. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf>.
 1.10.2012
- Elinkeino Elämän keskusliitto 2011. Mittojen ja massojen harmonisointi vaarantaisi kuljetusten tehokkuuden Suomessa.
http://ek2.ek.fi/eu/fi/uutiskirje/2011/4_2011_EUuutiskirje.php?we_objectID=13404
- EUROOPAN KOMISSIO 2012. TIIVISTELMÄ VAIKUTUSTEN ARVIOINNISTA Maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätalouden vaikutus EU:n ilmastomuutoksiin.
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2012:0040:FIN:FI:PDF>. 30.10.2012.
- Fischer, K., Akhtar, M., Blanchette, R.A., Burnes, T.A., Messner, K. & Kirk, T.K.1994. Reduction of Resin Content in Wood Chips during Experimental Biological Pulping Processes.<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1994/fisch94a.pdf>.
 9.10.2012
- Flyktman, M., Kärki, J., Hurskainen, M., Helynen, S. & Sipilä, K. 2011. Kivihien korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölykattiloissa VTT.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2595.pdf>. 5.10.2012
- Föhr, J. 2008. Metsähakkeen jalostusarvon nostaminen eri kuivausmenetelmillä. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto. Mekaanisen puunjälöstustekniikan opintosuunta.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/37417/nbnfife200804171245.pdf?sequence=3>. 9.10.2012
- Greencirclebio 2012.
<http://www.greencirclebio.com/plant.php>. 23.10.2012
- Haikonen, T 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Motiva Oy
http://www.motiva.fi/files/247/Tutkimus_biopolttoaineiden_aumakuivauksesta.pdf. 11.2.2013
- Hakkuutähdehake 2012.
<http://www.ncp.fi/bioenergia/hakkuutahdehake/2/2.3.htm>. 7.11.2012
- Happonen, K. 2011. Torrefied wood pellets as an alternative fuel to coal:

- Climate benefits and social desirability of production and use. University of Helsinki Department of Economics and Management Environmental Economics Master's thesis.
<http://hdl.handle.net/10138/31435>. 22.2.2013
- Huikuri, N. & Okkonen, L. 2012. Bioenergiaa Pielisen Karjalaan. Pielisin Karjalan bioenergiaverkostot ja –virrat osana Pohjois-Karjalan energiaomavaraisuutta-hankkeen vuosiraportti 2012. ISBN 978-952-275-046-4
- Hämäläinen, E ja Heinimö, J. 2006. Esiselvitys puupolttoaineen jalostamisesta torrefiointitekniikalla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energia- ja ympäristötekniinen osasto. Tutkimusraportti EN-B-170. ISBN 952-214-244-1. <http://doria17-kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/31048/TMP.objres.459.pdf?sequence=1>. 21.9.2012
- Ihalainen, T. & Niskanen, A. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjussa Metlan työraportteja s 56.
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp166.pdf>. 27.9.2012
- Ihalainen, T. & Sikanen, L. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset pelletintuotannon arvoketjussa 2010. Metlan työraportteja 181. ISBN 978-951-40-2271-5 (PDF). <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp181.pdf>. 1.9.2012
- Ilomantsin energiastrategian 2009-2020 toimenpideohjelma.
<http://www.ilomantsi.fi/dman/Document.phx/~kunta-ilomantsi/bioenergia/energiastrategian-toimenpideohjelma?folderId=~kunta-ilomantsi%2Fbioenergia&cmd=download>. 1.9.2012
- Kleinschmit C. Overview of international developments in torrefaction. 2011.
<http://www.bioenergytrade.org/downloads/grazkleinschmidtpaper2011.pdf>
 3.10.2012
- Klemola, K. Kivihiili. Teknillisen kemian laboratoria. Kemiantelekniiikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2011 s 20.
<http://www3.lut.fi/webhotel/teke/ktp/2012/5.1.3-coal.pdf>. 8.10.2012
- Kokkonen, A. & Lappalainen, I. 2005. Hakelämmöstä yritystoimintaa. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Motiva Oy. Työtehoseura. ISBN 951-604-049-7 s 83
- Korpinen, O.-J., Föhr, J., Saranen, J., Väättänen, K. & Ranta, T. 2011. Biopolttoaineiden saatavuus ja hankintalogistiikka Kaakkois-Suomessa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. LUT Energia-tutkimusraportti 12. ISBN 978-952-265-067-2.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-068-9>. 29.9.2012
- Kärkkäinen 2003
 Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet . ISBN 952-5118-51-7
 Metsälehti kustannus 338 s
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M & Asikainen, A. 2010. VTT Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet ISBN 978-951-38-7678-4. 149 s.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2564.pdf>. 9.10.2012
- Larsson, H., Rudolfsson, M., Olofsson, I., Samuelsson, R., 2012. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. Email lauri.sikanen@uef.fi. 10.10.2012.

- Lehtikangas, P 2001. Quantity properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and bioenergy 20 (2001) 351-360. <http://www.cityofnorthbay.ca/business/presentations/woodPellets/Quality%20properties%20of%20pelletised%20sawdust,.pdf> 5.10.2012
- Makkonen, J. 2012. "Kotimaista uusiutuvaa lähienenergiaa Hämeestä"-2011 selvitystyön päivitys. <http://www.jyrimakkonen.fi/RaporttiLOPULLINEN.pdf>. 30.10.2012.
- Makkonen, P 1996. Huonolaatuisten polttoaineiden poltto leijukattiloissa Foster Wheeler Energia Oy, Karhulan tutkimus- ja kehityskeskus s 11. <http://koti.mbnet.fi/ppom/PDF/Kemia97.pdf>. 3.9.2012
- Metso lehdistötiedote 2010. <http://www.metso.com/news/newsdocuments.nsf/web3newsdoc/99A0A732EB231D05C22578000049804D?OpenDocument&ch=ChMetsoWebFin&7.9.2012>
- Metsäkeskus Pohjois-Karjalan metsät 2012. <http://www.metsakeskus.fi/metsakeskus-ja-alueet/alueet/pohjois-karjala/tilastotietoa-metsista>. 7. 11.2012
- Metsäkeskus Hakkuut ja puuvarojen käyttö 2010. <http://www.metsakeskus.fi/metsakeskus-ja-alueet/alueet/pohjois-karjala/hakkuut-ja-puuvarojen-kaytto/>. 9.9.2012
- Miktech 2012. Julkaisu tiedote 20.2.2012. <http://www.miktech.fi/ajankohtaista/?issue=38>. 23.9.2012
- Nielsen, P., Gaardner, D., Felby, C. 2010. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236109003056>. 7.11.2012
- Obernberger, I. & Thek, G. The Pellet Handbook 2010. The Production and Thermal Utilisation of Pellets. <http://www.scribd.com/doc/91059767/The-Pellet-Handbook>. 7.11.2012
- Ohlström, M Energiatuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa VTT Enrgia 1998 s 147. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1934.pdf>. 7.11.2012
- Pellettienenergia 2012. <http://www.pellettienenergia.fi/>. 23.10.2012
- Pohjois-Karjalan maakuntaliitto 2012. Bioenergian mahdollisuudet Itä-Suomessa. <http://www.isbeo2020.fi/dman/Document.phx?documentId=ho34212093609512&cmd=download>. 24.2.2013
- Pohjois-Karjalan Bioenergiaohjelma 2015, 2007. ISBN 978-952-5138-98-6 (PDFPuolakanaho, K, 2007 Järviruo'on autokuljetusten logistiikka ja toimintolaskelma.Opinnäytetyö. Auto-ja kuljetustekniikka Turun ammattikorkeakoulu 63s. http://www.ruoko.fi/uploads/pdf/Kai_Puolakanaho.pdf. 5.11.2012
- Raussi-yhtiöt 2012. <http://www.raussinmetalli.com/framet1.htm>. 11.2.2013
- Riikilä, M. 2010 Metsälehti 23/ 2010,8. http://users.jyu.fi/~daagar/metsalehti_juttu.pdf . 24.9.2012
- Rouvari, K. 2005. Märkäkuorimon kiertovesien optimipoisto ja korroosio. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energia –ja ympäristötekniikan osasto. Diplomityö<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/29814/TMP.objres.226.pdf?sequence=1>. 11.2.2013
- Schorr, C., Muinonen, M. & Nurminen, F. 2012. Torrefaction of biomass. Miktech<http://www.miktech.fi/getfile.php?file=161> .11.2.2013

- Seppänen, H. & Kuittinen, S 2008. TMP-Jauhinterien kipsaantumisen ja pihkaantumisen syyt ja estäminen. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Metsä- ja puutalouden markkinoinnin koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Suomen Metsäkeskus Pohjois-Karjalan metsäohjelma 2012
2015. http://www.metsakeskus.fi/fi_FI/c/document_library/get_file?uuid=9f651108-bb55-44d5-9986-d0bf9867c1f8&groupId=10156. 6.11.2012
- Tarek, K & Hafez, M. 2011. Kosteuden ja lämpötilan vaikutus paperin kriittisiin ominaisuuksiin. Opinnäytetyö 2011. Paperitekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu.
<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/32105/Hafez%20Kari.m.pdf?sequence=1>. 4.11.2012
- Tilastokeskus 2012
http://www.stat.fi/til/ehk/2012/01/ehk_2012_01_2012-06-20_tie_001_fi.html. 6.11.2012
- Topell Energy 2012. <http://www.topellenergy.com/>
- Työ -ja Elinkeinoministeriö 2012. Cleantechin strateginen ohjelma.
http://www.tem.fi/?105608_m=107251&s=4834)
- Työ -ja Elinkeinoministeriö 2010. Hallituksen energialinja – kohti vähäpäästöistä Suomea. http://www.tem.fi/files/26643/UE_lo_velvoitepaketti_Kesaranta_200410.pdf. 7.11.2012
- UEF ja Pellettienergiayhdistys 2010. Tiedote: Kotimaista pellettiä riittää.
<http://www.pellettienergia.fi/index.php/media/tiedotteet/39-median-tiedotteet/160-uef-ja-pellettienergiayhdistys-kotimaista-pellettie-riittaa>. 7.11.2012
- Vanninen, M. Tyypillisten biomassamateriaalien kemiallinen koostumus. Pro gradu – tutkielma. Jyväskylän yliopisto. Kemian laitos. Soveltavan kemian osasto. Jyväskylä. 2009. 43 s.
- VTT tiedotteet 2011 VTT selvitti kivihiilen käytön korvaamista uusiutuvilla energialähteillä.
http://www.tem.fi/index.phtml?105033_m=102421&s=4760. 24.2.2013
- Virkkunen, M. Martti, F. ja Jyrki, R. VTT. 2012. Puuhiilen tuotanto Suomessa- mahdollisuudet ja haasteet.
www.balbic.eu/fi/.../fi.../Puuhiilen_tuotanto_Suomessa_VTT.pdf
27.1.2013
- Wihersaari, M. Agar, D 2010. Torrefiointiprosessi biomassan jalostaminen” biohiili”. http://users.jyu.fi/~daagar/agar_torrefiointi_fi.pdf. 24.9.2012
- Wihersaari, M ja Palosuo, T. VTT Energia raportteja 8/2000. Puuenergia ja kasvihuonekaasut. Osa 1: Päätehakkuun haketuotantoketjujen kasvihuonekaasupäästöt. <http://www.topellenergy.com/product/raw-materials/>. 24.2.2013
- Ylitalo, E. 2012. Metsäntutkimuslaitos, metsätilastollinen tietopalvelu. Metsätilastotiedote 12/2012. Puupelletti 2011.
<http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/mtt/2012/puupelletti11.pdf>. 10.10.2012